



Miguel André Póvoa Rodrigues

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Simulador Baseado em Agentes para redes inteligentes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: José António Barata de Oliveira, Professor Doutor, FCT-UNL

Co-orientador: André Dionísio Bettencourt da Silva Parreira Rocha, Mestre, UNINOVA/CTS

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Alexandre da Costa Sousa, Professor Auxiliar da FCT-UNL

Arguente: Doutor Tiago Oliveira Machado de Figueiredo Cardoso, Professor Auxiliar da FCT-UNL

Vogal: Doutor José António Barata de Oliveira, Professor Auxiliar da FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2016

Simulador Baseado em Agentes para redes inteligentes

Copyright © Miguel André Póvoa Rodrigues, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Nesta secção gostaria de agradecer a todos os que me ajudaram e contribuíram para a realização desta dissertação.

Em primeiro lugar, queria agradecer ao meu orientador Professor Doutor José Barata por me ter dado a conhecer este tema de dissertação e de poder desenvolvê-lo.

Gostaria, também, de agradecer ao meu co-orientador Mestre André Rocha pelo enorme apoio quer nos bons momentos quer nos maus momentos e por nunca, em qualquer momento, me ter deixado desamparado ou sozinho, apesar da minha relutância em pedir ajuda. Durante o tempo que dediquei à realização desta dissertação, adquiri conhecimentos e desenvolvi técnicas importantes a nível académico e tornei-me melhor pessoa.

Expresso a minha gratidão para com José Ferreira e para com os meus colegas de curso Cristiano Pereira, Daniel Pombeira, Daniel Matado, João Pedras, Fábio Oliveira, Bruno Guerreiro, e, claro, Luís Casimiro, pois sem eles todo o meu sucesso académico seria muito mais complicado. Mostraram-se excelentes amigos, sempre disponíveis para trabalhar comigo ou descontraír após um longo dia de trabalho. Foram, sem dúvida, excelentes colegas e amigos.

Também gostaria de agradecer a Nelson Zacarias, João Saraiva e João Neto não só pelo enorme e importante apoio que me concederam nos bons e maus momentos desta jornada como pelos momentos de descontração.

É importante referir Ana Roque e Ana Dias pelas suas críticas e motivação sempre necessárias, frontais e amigáveis. Estiveram comigo durante muito tempo e mostraram-se sempre disponíveis para me ajudar. Obrigado a ambas por isso.

Gostaria de agradecer a Ana Graça pela motivação e pelo seu apoio na reta final deste trabalho, mesmo quando parecia que tudo era complicado.

Não posso deixar de agradecer ao Professor Fernando Coito, por ter sido um professor que continuamente me motivou para a finalização desta etapa.

Não podia, ainda, deixar de parte Catarina Lucena, minha colega de trabalho na UNINOVA, por, juntamente com José Ferreira, ter sido a pessoa que mais me ajudou nesta fase tão importante da minha vida.

Por fim agradeço a toda a minha família, em especial, ao meu pai, à minha mãe e ao meu irmão, e claro, à minha madrinha e ao meu padrinho pelo apoio, pela oportunidade de terminar os estudos académicos e pela confiança prestada. Agradeço-lhes, e muito, por tudo o que fizeram por mim.

A todos os que mencionei e a todos os que, por lapso, não mencionei, o meu mais profundo obrigado pelo privilégio que tenho em ter-vos como amigos.

Resumo

A liberalização dos mercados de energia, e a utilização intensiva de energia quer na produção quer na distribuição, têm vindo a provocar uma alteração no paradigma de operação das redes de distribuição de energia elétrica. A fiabilidade das redes de distribuição no contexto destes novos paradigmas requerem alterações estruturais e funcionais. O conceito de SmartGrid (SG) vem permitir a adaptação das redes de distribuição ao novo contexto.

O transporte de energia é realizado através de um processo manual de distribuição desde o produtor até ao consumidor.

Neste trabalho, é proposta uma arquitetura organizada de apoio ao sistema de transporte de energia, que desempenha funções de gestão e de controlo do mesmo. A arquitetura proposta tem como objetivo que cada produtor, cada consumidor e cada posto de distribuição corresponda a um agente, com funções e características diferentes entre si consoante a sua tarefa.

Com esta nova aplicação todo o processo de transporte de energia é efetuado por um algoritmo, dotando o sistema de maior capacidade de flexibilidade e de adaptação.

A arquitetura proposta é uma arquitetura multiagente na qual é utilizado o algoritmo de fluxos para um encaminhamento mais eficaz e que tem como principal objetivo fazer o balanço de toda a rede elétrica e com isso distribuir de forma eficaz e eficiente a energia entre os diversos produtores e os diversos consumidores. Foi usado um algoritmo de pesquisa para tornar análise da rede elétrica como auxílio ao algoritmo de fluxos para tornar uma análise mais completa da rede.

Com as comunicações dos agentes e com os algoritmos como método de decisão tornando uma arquitetura complexa e com um rápido desempenho nos testes efetuados.

Toda a arquitetura foi testada num ambiente virtual de modo a serem analisados os comportamentos e toda a sua estrutura.

Palavras-Chave: Transporte de Energia, Sistema Multiagente, Rede Inteligente, Produtor, Consumidor, Auto-Configurar, Smart Grid

Abstract

The liberalization of energy markets, energy generation of intensive use has provoked a change in the operating paradigm of the electricity distribution networks. The reliability of the distribution networks in the context of these new paradigms requires structural and functional changes. The concept of Smart Grid allows the adaptation of the distribution networks to the new context.

The energy transport is accomplished through an distribution manual process, from the producer till the consumer.

On this paper, it is proposed an organized architecture of support to the power transmission system, which manages and controls itself. The proposed architecture aims to match each producer, each consumer and each distribution station to an agent with different functions and features, depending on its task.

With this new application all the the energy transportation process is performed by an algorithm, providing the system with a greater capacity of flexibility and adaptation.

The proposed architecture is a multi-agent architecture in which is used the algorithm of flow for a more efficient routing. Their main aim is to stock the entire electrical grid and distribute the energy effectively and efficiently between the various producers to and the various consumers. A search algorithm was used to make analysis of the electrical network as an aid to the flow algorithm to make a more complete analysis of the network.

With the communications of the agents and with the algorithms as method of decision, making a complex architecture and obtained a fast performance in the carried out tests.

The whole architecture has been tested on a virtual environment so that the behaviours and the entire structure could be analyzed.

Keywords: Energy Transportation, Multi-Agent System, Intelligent Network, Producer, Consumer, Auto-Configuration, Smart Grid

Acrónimos

ABF	Algoritmo de Bellman-Ford
AD	Algoritmo de Dijkstra
AEK	Algoritmo de Edmonds-Karp
AF	Algoritmo de Fluxos
AFF	Algoritmo de Ford-Fulkerson
BFS	Breadth-First Search
CA	Consumer Agent
DFS	Depth-First Search
DLA	DistributorLine Agent
EK	Edmonds-Karp Maximum Flow
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
JADE	Java Agent Development Framework
PA	Producer Agent
SG	Smart Grid
SMA	Sistemas Multi-Agente

Índice de Conteúdos

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Principais Contribuições.....	2
1.4.	Organização da Dissertação.....	3
2.	Estado da Arte.....	5
2.1.	Rede Elétrica.....	5
2.1.1.	Problema da rede elétrica	5
2.1.2.	Produção de Energia	6
2.1.3.	Necessidade de criar uma rede elétrica inteligente (SmartGrid)	7
2.1.4.	Caso de Estudo.....	9
2.2.	Sistemas Multi-Agente	10
2.2.1.	Aplicações de um sistema Multi-Agente	10
2.3.	Estudo de diferentes Algoritmos	10
2.3.1.	Análise dos Algoritmos Estudados.....	11
2.3.2.	Complexidade Temporal dos Algoritmos	12
2.3.3.	Particularidades dos Algoritmos.....	12
2.3.4.	Análise dos Algoritmos de Pesquisa.....	12
2.4.	Conclusões Gerais.....	13
3.	Arquitetura	15
3.1.	Arquitetura do Sistema.....	15
3.2.	Características dos Agentes	16
3.3.	Representação Lógica	17
3.4.	Consumer Agent	18
3.5.	Producer Agent e DistribuidorLine Agent.....	19
3.6.	Algoritmo de Pesquisa	19
3.6.1.	Necessidade de usar o Algoritmo	19
3.6.2.	Funcionamento do Algoritmo	20
3.6.3.	Esquemático do Algoritmo	20
3.7.	Algoritmo de Fluxos	21
3.7.1.	Impacto da Energia no Algoritmo.....	21
3.7.2.	Funcionamento do Algoritmo	21
3.7.3.	Esquemático do Algoritmo	22
3.8.	Adicionar ou Remover Nós	23
4.	Implementação	25

4.1.	Consumer Agent	25
4.1.1.	Execução.....	26
4.1.2.	Behaviours	27
4.2.	Producer Agent e DistributorLine Agent	28
4.2.1.	Conteúdo da mensagem do Consumidor	29
4.3.	Algoritmo de Pesquisa	29
4.3.1.	Fluxograma	29
4.4.	Algoritmo de Fluxos	30
4.4.1.	Fluxograma	30
4.4.2.	Componente de Visualização do Algoritmo	31
4.4.3.	Particularidades.....	33
5.	Validação e Testes.....	35
5.1.	Sistema Virtual	35
5.1.1.	Testes e Simulação do Sistema.....	35
5.1.1.1.	Primeira Simulação	35
5.1.1.2.	Segunda Simulação	39
5.1.1.3.	Terceira Simulação	42
5.2.	Discussão de Resultados.....	46
6.	Conclusões e Trabalho Futuro	51
6.1.	Conclusões.....	51
6.2.	Trabalho Futuro.....	51
7.	Referências	53

Índice de Figuras

Figura 1 - Transporte de Energia desde o Produtor até ao Consumidor sem SmartGrid.....	1
Figura 2 - Transporte de Energia desde o Produtor até ao Consumidor com SmartGrid.....	2
Figura 3 - Dados Relativos à Produção de Energia Elétrica em Portugal.....	7
Figura 4 - Na esquerda rede elétrica convencional e na direita uma smartgrid.....	9
Figura 5 - Arquitetura do Sistema.....	15
Figura 6 - Representação Lógica a partir de um exemplo.....	17
Figura 7 - Esquemático do CA.....	18
Figura 8 - Esquemático de funcionamento PA e DLA.....	19
Figura 9 - Ordem de funcionamento do algoritmo DFS.....	20
Figura 10 - Esquemático do Algoritmo de Pesquisa.....	20
Figura 11 - Ordem de funcionamento do algoritmo BFS.....	21
Figura 12 - Grafo Bipartido.....	22
Figura 13 - Descrição do Edmonds-Karp.....	22
Figura 14 - Esquemático Algoritmo de Fluxos.....	23
Figura 15 - Adicionar ou Remover Nós.....	24
Figura 16 - Esquemático do CA.....	25
Figura 17 - Diagrama de Sequência.....	26
Figura 18 - Behaviour responsável pela comunicação e pela actualização da rede.....	27
Figura 19 - Esquemático do PA e DLA.....	28
Figura 20 - Fluxograma do Algoritmo de Pesquisa.....	30
Figura 21 - Fluxograma AEK.....	31
Figura 22 - Descrição dos componentes da visualização.....	32
Figura 23 - Ferramenta de visualização do AEK.....	32
Figura 24 - Algoritmo PathFlow e AEK juntamente com o PathFlow.....	33
Figura 25 - Descrição dos símbolos.....	35
Figura 26 - Primeira Simulação - Esquema Original.....	36
Figura 27 - Primeira Simulação - Remoção do Nó DLA_1.....	37
Figura 28 - Primeira Simulação - Adição do Nó DLA_3.....	37
Figura 29 - Primeira Simulação - Remoção do Nó DLA_2.....	38
Figura 30 - Primeira Simulação - Adição do Nó DLA_5.....	38
Figura 31 - Segunda Simulação - Esquema Original.....	39
Figura 32 - Segunda Simulação - Remoção do Nó DLA_1.....	40
Figura 33 - Segunda Simulação - Adição do Nó DLA_9.....	40
Figura 34 - Segunda Simulação - Remoção do Nó DLA_7.....	41
Figura 35 - Segunda Simulação - Adição do Nó DLA_10.....	41
Figura 36 - Terceira Simulação - Esquema Original.....	43
Figura 37 - Terceira Simulação - Remoção do Nó DLA_1.....	44

Figura 38 - Terceira Simulação - Adição do Nó DLA_20.....	44
Figura 39 - Terceira Simulação - Remoção do Nó DLA_11	45
Figura 40 - Terceira Simulação - Adição do Nó DLA_21	45
Figura 41 - Resultados Temporais da Primeira Simulação	47
Figura 42 - Resultados Temporais da Segunda Simulação	48
Figura 43 - Resultados Temporais da Terceira Simulação	49
Figura 44 - Resultados das três simulações.....	50

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre rede elétrica tradicional com smart grid.....	8
Tabela 2 - Complexidade de cada Algoritmo.....	12
Tabela 3 - Agentes e as suas funções.....	16
Tabela 4 - Parâmetros dos Agentes	17
Tabela 5 - Informações sobre cada componente.....	36
Tabela 6 - Informações sobre cada componente.....	39
Tabela 7 - Informações sobre cada componente.....	42
Tabela 8 - Média e desvio padrão da primeira simulação	47
Tabela 9 - Média e desvio padrão da segunda simulação	48
Tabela 10 - Média e desvio padrão da terceira simulação	49

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Hoje em dia a produção e distribuição de energia são realizadas como ilustra a Figura 1, a partir de uma central produtora de energia (como Hidroelétrica, Termoelétrica, ou outras). A energia é produzida nestas centrais e enviada para o consumidor através de postos de distribuição. A partir deste facto, detetamos, um processo manual de distribuição da energia que, no caso de uma falha ou de avaria de um posto de distribuição, provocará uma falha de energia junto dos consumidores, por muito ou pouco tempo, o que não os beneficia.

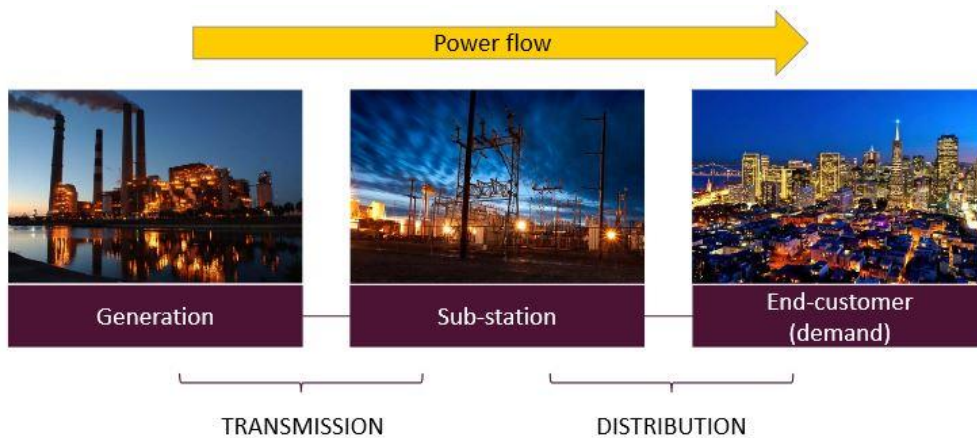


Figura 1 - Transporte de Energia desde o Produtor até ao Consumidor sem SmartGrid (Low, 2014)

Estas limitações levaram à criação do conceito de SmartGrid. O conceito vem de uma distribuição energética mais eficiente, confiável e sustentável somando com tecnologia de informação. A principal vantagem deste sistema é automatizar toda a rede elétrica e possibilitar a comunicação entre toda a rede.

Na Figura 2 observamos claramente enormes mudanças comparativamente à Figura 1. O processo de produção e distribuição será exatamente o mesmo, apenas com a diferença de haver sensores a monitorizar toda a rede elétrica incluindo o consumidor final. Com a produção de energia via energias renováveis adicionando os sensores, ficaria uma rede mais amiga para o ambiente e diminuindo as falhas de energia, como poderemos observar no capítulo 2.1.3.

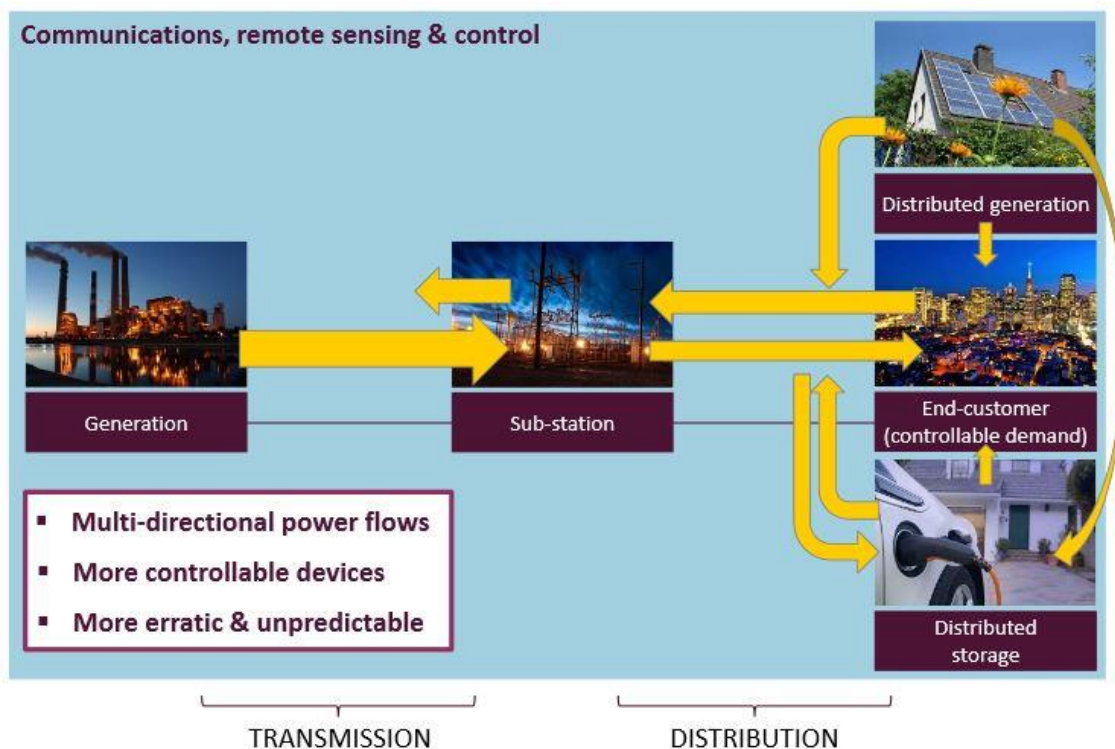


Figura 2 - Transporte de Energia desde o Produtor até ao Consumidor com SmartGrid (Low, 2014)

1.2. Objetivos

Sempre houve uma necessidade de tornar todo o processo inteligente e automático. O apresentado no subcapítulo anterior conduz-nos às seguintes e relevantes questões:

- Será possível dotar uma rede elétrica inteligente (SmartGrid) com poder de decisão e de autoconfiguração?
- Que tipo de arquitetura poderia suportar todo esse processo?

No sentido de responder a estas tão pertinentes perguntas, elaborou-se uma proposta que se apresenta e se descreve nesta tese. A base da proposta consiste na colocação de um algoritmo de fluxos numa arquitetura multi-agente, ambos desenhados e construídos para o presente estudo. Este algoritmo possui a capacidade de se autoconfigurar e de analisar toda a rede elétrica, observando cada alteração que o mesmo possa provocar.

1.3. Principais Contribuições

As principais contribuições do trabalho realizado foram motivadas pela vontade de criar e apresentar uma arquitetura que permita a otimização do processo de distribuição de energia que circula desde o produtor até ao consumidor, e contribuindo desta forma, para o aumento do conhecimento na área dentro da comunidade científica, com o artigo An Evolvable and Adaptable

Agent Based Smart Grid Management – A Simulation Environment, podemos verificar no subcapítulo 6.2.

Note-se que as linhas estão constantemente a ser percorridas por energia. Note-se, também, que o sistema se auto-organiza após a introdução do algoritmo de fluxos na arquitetura, levando a alterações da rede e, conseqüentemente, possibilitando a adaptação e a atualização da própria arquitetura.

1.4. Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos principais.

No capítulo 2, abordam-se os problemas existentes na rede elétrica convencional ainda sem resolução e os algoritmos estudados para o nosso problema.

No capítulo 3, aborda-se a arquitetura escolhida. Neste capítulo será também detalhado o algoritmo e o motivo pelo qual o algoritmo é o mais adequado para resolver as questões apresentadas em 1.2.

A implementação que se encontra explícita no capítulo 4 contém toda a explicação do modelo escolhido, bem como as particularidades do mesmo.

No capítulo 5, Validação e Testes, apresentam-se os resultados obtidos sobre toda a arquitetura em ambientes simulados.

Por fim, no capítulo 6, com os testes efetuados no capítulo anterior, expõem-se as conclusões alcançadas sobre todo o sistema.

2. Estado da Arte

2.1. Rede Elétrica

Em 1752 Benjamin Franklin foi famoso para amarrar uma chave a um papagaio durante uma tempestade, provando que a eletricidade estática e iluminação foram de fato, a mesma coisa. Aprender a produzir e o uso de eletricidade não foi fácil. Em 1800, Alessandro Volta, um cientista italiano, fez uma grande descoberta. Embebido de papel em água salgada, colocado zinco e cobre em lados opostos do papel, e observou a reação química produz uma corrente elétrica. Volta criou a primeira célula elétrica. Em 1879 Thomas Edison inventou o que é considerado o precursor da lâmpada moderna. O próximo desafio em 1882 foi desenvolver um sistema elétrico que pudesse proporcionar às pessoas energia para as suas casas, então projetou e construiu a primeira central de energia elétrica na qual foi capaz de produzir eletricidade e transportá-la para as casas das pessoas (Project, 2016).

Em Portugal no ano de 1951 foi inaugurada a denominada Rede Primária, com a entrada da central de Castelo de Bode ligado a Lisboa. Meses mais tarde entraram em serviço as linhas que interligaram Vila Nova a Ermesinde e Ermesinde ao Zêzere. A Rede Elétrica Nacional face à sempre crescente necessidade de eletricidade nos consumos domésticos e empresariais (públicos e privados) foi construindo o seu caminho, crescendo sucessivamente, ano após ano (Amorim, 2003).

A rede elétrica divide-se, como vimos anteriormente, em duas grandes áreas: produção e distribuição (S.N.Singh, 2008).

Uma parte da produção de energia, hoje em dia, é realizada por centrais Hidroelétricas, Termoelétricas e Nucleares, sendo a restante parte realizada pelas centrais de energia renovável. Não obstante, todas partilham o mesmo objetivo: produzir energia suficiente para os clientes ainda que de diversas formas.

A distribuição tem como função levar a energia até aos consumidores finais (domésticos, empresariais ou industriais).

2.1.1. Problema da rede elétrica

Como já foi referido no capítulo anterior, a distribuição de energia apresenta falhas a curto e a longo prazo. Cada vez mais existe uma maior necessidade de produção de energia, obrigando à gestão, otimização e ao aumento da eficiência de todo o processo de produção e distribuição.

O problema da produção de energia é resolvido com as novas energias uma vez que a produção convencional de energia não é, presentemente, sustentável.

Os problemas da rede elétrica começa com os apagões, em 2012 na Índia afetou mais de 600 milhões de pessoas, em 2009 60 milhões de pessoas entre Brasil e Paraguai, em 2008 na China levou com que 4 milhões de pessoas não tivessem eletricidade e o maior apagão dos Estados Unidos da América que abrangeu 55 milhões de pessoas sem eletricidade. Com tudo isto e adicionando os enormes custos para as infraestruturas, e para a sua manutenção torna-se claro a necessidade de uma mudança do paradigma energético (Dongale, 2013).

Os principais problemas da rede elétrica tradicional (Joy, Jasmin, & John, 2013):

- Idade, pois a maioria dos casos apresenta estações de produção de energia com mais de 35 anos;
- Mais de metade da produção de energia é realizada através do carvão;
- Ineficiente, a eficiência energética que chega aos consumidores é de 35%;
- Vulnerabilidade, o maior apagão da história afetou 620 milhões de pessoas.

2.1.2. Produção de Energia

Com o passar dos anos, foi sendo óbvio que as centrais convencionais de produção de energia anteriormente enunciadas não serão suficientes e, por isso, surgiu a oportunidade de se explorar energia limpa como as energias renováveis.

As energias renováveis que temos disponíveis são (Alrikabi, 2014):

- Eólica;
- Solar ou Fotovoltaica;
- Hídrica;
- Biomassa;
- Ondas e Marés;
- Geotérmica.

Sobre a energia eólica, o vento, em última análise, impulsionado por ar atmosférico, é apenas uma outra forma de obtenção de energia. Ele funciona em dias nublados e chuvosos. A localização de turbinas eólicas é um fator muito importante, que influencia o desempenho da própria eólica geralmente localizada aproximadamente a 30 metros (Alrikabi, 2014).

Sobre a energia solar ou fotovoltaica, o sol tem o maior potencial para fornecer energia limpa, segura e confiável. Os governos começaram a adotar subsídios e incentivos para quem instalasse um conjunto de painéis solares em casa, na qual poderia vender energia excedente (Alrikabi, 2014).

Sobre a energia hídrica é a eletricidade produzida através da utilização da força gravitacional da queda ou água corrente (Bagher, Vahid, Mohsen, & Parvin, 2015).

Sobre a energia da biomassa cobre toda uma gama de formas de energia. A definição de biomassa vegetal ou planta é a matéria, por vezes, de animais, que pode ser convertido em uma fonte de energia (Bagher, Biomass Energy, 2014).

Sobre a energia das ondas e marés, é produzida através da utilização de geradores. As grandes turbinas subaquáticas são colocados em áreas com altos movimentos das marés e projetado para capturar o movimento cinético da vazante e surgimento de marés do oceano, a fim de produzir eletricidade (Ali, Faruk, & Gupata, 2012).

Por fim em relação a energia geotérmica corresponde aos fluidos e formações geológicas do subsolo, de temperatura elevada, cujo calor seja suscetível de aproveitamento (Alrikabi, 2014).

Na Figura 3, consegue-se perceber que as energias renováveis têm cada vez mais um impacto positivo na produção de energia. Em Portugal, a produção de energias renováveis encontrava-se na ordem dos 50% no ano de 2014 (PORDATA, 2016).

Anos	Produção de energia eléctrica							
	Total	A partir de fontes renováveis						
		Total	Hídrica > 10MW	Hídrica < 10MW	Biomassa	Eólica	Geotérmica	Fotovoltaica
2000	43 764	13 260	11 040	675	1 296	168	80	1
2001	46 509	16 083	13 605	770	1 345	256	105	2
2002	46 107	10 190	7 551	706	1 473	362	96	2
2003	46 852	18 037	15 163	891	1 394	496	90	3
2004	45 105	12 597	9 570	577	1 547	816	84	3
2005	46 575	8 616	4 737	381	1 651	1 773	71	3
2006	49 041	16 187	10 633	834	1 704	2 926	85	5
2007	47 253	16 593	9 927	522	1 882	4 037	201	24
2008	45 969	15 140	6 781	517	1 852	5 757	192	41
2009	50 207	19 017	8 108	901	2 087	7 577	184	160
2010	54 093	28 754	15 459	1 088	2 614	9 182	197	214
2011	52 465	24 691	11 294	820	2 923	9 162	210	282
2012	46 614	20 410	6 093	567	2 951	10 260	146	393
2013	51 673	30 610	13 701	1 167	3 051	12 015	197	479
2014	52 802	32 405	15 071	1 341	3 049	12 111	205	627

Figura 3 - Dados Relativos à Produção de Energia Elétrica em Portugal pelo período de 10 anos; valores apresentados em GWh (Gigawatt-hora)
Fonte: PORDATA, Atualizado em 04-01-2016 (PORDATA, 2016).

2.1.3. Necessidade de criar uma rede elétrica inteligente (SmartGrid)

Uma SmartGrid (SG) é definida como a junção de sistemas de comunicação à rede elétrica de forma a torná-la inteligente. A criação de uma rede elétrica inteligente é imperativa nos nossos dias, sendo uma solução a médio-longo prazo para os problemas que as redes convencionais têm vindo a apresentar.

Como foi visto anteriormente, com a escassez de recursos e com a necessidade crescente de mais energia, terá que se utilizar um sistema inteligente com capacidade de verificar se realmente é necessário mais ou menos energia. Para que tal seja possível, a SG conta com a instalação de sensores e de sistemas em toda a rede elétrica que comuniquem entre si. O sensor indica ao produtor que o consumidor necessita de mais energia. O produtor, por sua vez, e após a receção da mensagem proveniente do consumidor, enviará mais energia convencional ou limpa. A possibilidade de uso de qualquer tipo de energia faz da rede elétrica inteligente uma rede confiável e sustentável. É de salientar que a rede elétrica inteligente que se defende neste trabalho foi conceptualizada tendo em conta o bem-estar do consumidor final, ofertando-lhe um sistema de energia de máxima capacidade e com diferentes e variadas opções energéticas.

No entanto, a indústria de energia elétrica já se encontra em evolução, o que revolucionará, acredito, a maneira como entregamos eletricidade a consumidores individuais. A componente SG é uma rede inteligente que analisa constantemente a energia em consumo, ofertando uma boa relação tempo real-preço, como resposta ao pedido de energia por hora e à expansão das escolhas energéticas pelos clientes para promoção da eficiência energética (Keyhani & Marwali, 2011).

Como podemos visualizar na seguinte tabela as diferenças entre a tradicional rede elétrica com SG.

Tabela 1 - Comparação entre rede elétrica tradicional com smart grid
(Fang, Misra, Xue, & Yang, 2012)

Rede Elétrica Tradicional	SmartGrid
Eletromecânica	Digital
Comunicação unidirecional	Comunicação bidirecional
Geração centralizada	Geração distribuída
Poucos Sensores	Sensores em toda a rede
Monitorização manual	Monitorização automática
Restauração manual	Restauração automática
Falhas e apagões	Adaptativa
Controlo limitado	Controlo total
Poucas escolhas dadas ao cliente	Diversas escolhas dadas ao cliente

Na Tabela 1 podemos visualizar o potencial e as principais diferenças entre ambos os sistemas, e obviamente verificar que é de todo uma opção viável a curto e longo prazo. Sendo que o potencial melhoramento quer para a própria estrutura quer para o cliente é enorme.

Para uma visualização sobre as diferenças entre a rede tradicional e a smartgrid, pode-se observar na Figura 4.

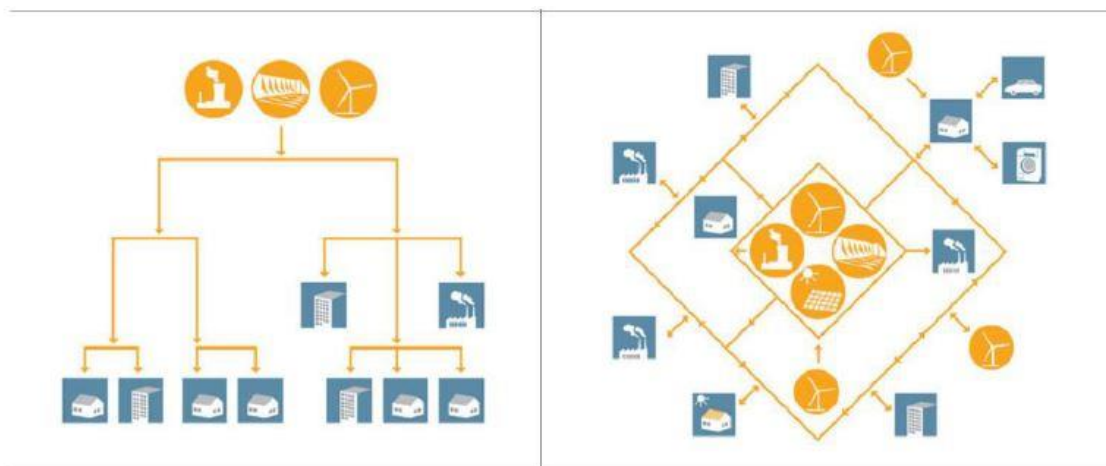


Figura 4 - Na esquerda rede elétrica convencional e na direita uma smartgrid
(Prasad, 2014).

2.1.4.Caso de Estudo

Na Índia para poderem avaliar os verdadeiros benefícios de SG, o governo propôs 14 projetos piloto com diferentes funcionalidades (Kappagantu, Senn, Mahesh.M, & Daniel, 2015). Atualmente estes projetos se encontram em fase de implementação, cujos objetivos são endogeneização da tecnologia, o desenvolvimento de modelos escaláveis e replicáveis, trazendo acima das normas e regulamentações adequadas com base nestas experiências.

O principal objetivo do projeto é implementar vários componentes do SG da seguinte forma (Kappagantu, Senn, Mahesh.M, & Daniel, 2015):

- Sistema de medição avançada;
- Gerenciamento de carga de pico;
- Gestão de qualidade de energia;
- Interrupção de gerenciamento do sistema;
- Controle de supervisão e sistema de gestão/distribuição de aquisição de dados;
- Integração das energias renováveis;
- Sistemas de armazenamento de energia;
- Iluminação de rua;
- Veículo Elétricos.

Na implementação os maiores desafios foram (Kappagantu, Senn, Mahesh.M, & Daniel, 2015):

- Interoperabilidade;
- Segurança cibernética;
- Tecnologias de Comunicação;
- Barreiras Sociais;
- Barreiras políticas.

Estudos preliminares mostram melhoria na eficiência e confiabilidade da rede de distribuição. Computação distribuída e de comunicações que fornecem informações em tempo real e permitir o equilíbrio quase instantânea de oferta e de pedidos no nível do dispositivo foi incorporado. Por parte do consumidor também obtêm benefícios através da monitorização/ajustando cargas além de economizar a energia através da resposta à procura.

2.2. Sistemas Multi-Agente

Os Sistemas Multi-Agente (SMA) são sistemas compostos por múltiplos agentes que exibem simultaneamente comportamentos autónomos e de interação. Ou seja, estes agentes exibem duas características fundamentais. Por um lado, são capazes de agir de forma autónoma, tomando decisões e levando à satisfação dos seus objetivos. Por outro, são capazes de interagir com outros agentes, utilizando protocolos de interação social inspirados nos humanos com a inclusão de algumas das seguintes funcionalidades: coordenação, cooperação, competição e negociação.

Os SMA constituem um campo relativamente novo nas ciências da computação. Embora o início da investigação neste campo se tenha dado nos anos 80, só em meados dos anos 90 ganhou uma notoriedade digna de destaque (Wooldridge, 2002). Ao longo dos últimos anos, a investigação no campo dos Sistemas Multi-Agente tem sofrido um acentuado crescimento.

2.2.1. Aplicações de um sistema Multi-Agente

Estes sistemas têm uma diversidade de uso e são usados/aplicados em casos muitos distintos. Essa mesma diversidade irá ser apresentada com dois casos, um sistema multi-agente numa linha de produção e outro caso será um sistema multiagente numa simulação de um ambiente virtual de treino.

No primeiro caso foi usado um sistema multi-agente para poder integrar o sistema de transporte presente numa linha de montagem, e que habitualmente é excluído, de modo a poder tomar decisão em relação ao balanceamento de carga e otimização da produção (Rocha, 2013).

No segundo caso o sistema foi inserido no âmbito da defesa militar e segurança nacional. Para os treinos dos militares serem mais realistas opta-se por um sistema multi-agente capaz de produzir e simular um ambiente de guerra ou de ataque nacional (Chamorro & Montes, 2013).

Como podemos observar pelos dois casos descritos anteriormente, o sistema multi-agente tem uma boa capacidade de adaptação, e um bom potencial para os mais diversos desafios.

2.3. Estudo de diferentes Algoritmos

Para resolver os problemas encontrados, é necessário utilizar diferentes algoritmos. Para a escolha do algoritmo adequado, utilizaram-se os seguintes critérios: complexidade temporal, eficiência em encontrar o melhor trajeto entre um produtor e um consumidor e a capacidade de analisar toda a rede como um todo.

Os algoritmos estudados são:

- Algoritmo de Dijkstra (AD);
- Algoritmo de Edmonds Karp (AEK);
- Algoritmo de Bellman-Ford (ABF);
- Algoritmo de Ford–Fulkerson (AFF).

De seguida, iremos estudar cada um dos algoritmos, separando-os em dois grupos: os algoritmos de caminho mínimo e os algoritmos de fluxo máximo.

Fluxo Máximo: Algoritmo de Edmonds Karp e o Algoritmo de Ford–Fulkerson.

Caminho Mínimo: Algoritmo de Dijkstra e o Algoritmo de Bellman-Ford.

O AD e ABF são algoritmos de caminhos mais curtos, ou seja, consoante o “custo”, por exemplo preço, km, ambos os algoritmos irão verificar qual é mais curto ou mais económico entre todos os caminhos de A-B.

O AEK e o AFF são algoritmos pensado inicialmente para resolver o problema existente de fluxos, caudais de água, ou caminhos-de-ferro, são alguns dos exemplos. Os algoritmos conseguem avaliar toda a rede e calcular qual o melhor caminho entre os pontos iniciais e os pontos finais.

2.3.1. Análise dos Algoritmos Estudados

O algoritmo de Dijkstra foi criado por Edsger Wybe Dijkstra, em 1959, com o propósito de resolver o problema de caminho mínimo. Ou seja, descobrir a forma de ir do ponto A até ao ponto B com o menor custo possível. E para isso, a ideia por trás do algoritmo é simples: associar a cada ligação um peso (energia, km, custo,...) e com esse mesmo peso conseguir determinar o menor valor de uma ligação de A a B (Patel & ChitraBaggar, 2014).

O algoritmo de Bellman-Ford foi criado por Richard Bellman e por Lester Ford Jr. Ford publicou o seu estudo em 1956. Posteriormente, Bellman publicou o algoritmo de Ford em versão melhorada, em 1959. O objetivo deste algoritmo é semelhante ao do algoritmo anterior: encontrar o caminho mínimo desde o ponto A ao ponto B. Contudo, ao contrário do algoritmo de Dijkstra que apenas aceita pesos positivos, todos os custos do algoritmo de Bellman-Ford, ou seja, o peso da ligação entre os pontos A e B, poderão ser negativos (Patel & ChitraBaggar, 2014).

O algoritmo de Ford–Fulkerson foi desenvolvido por Lester Randolph For Jr. e por Delbert Ray Fulkerson com o objetivo de resolver os problemas de fluxos de uma rede. O algoritmo procura o fluxo máximo numa rede (Khan, Rashid, Khan, & Uddin, 2013).

Mais tarde, veio a surgir uma implementação do algoritmo de Ford–Fulkerson mas melhorada, a que se chamou algoritmo de Edmonds Karp, criado por Jack Edmonds e por Richard Karp, em 1972.

A particularidade deste algoritmo é que em cada interação ele procura o caminho mais curto (Khan, Rashid, Khan, & Uddin, 2013).

2.3.2. Complexidade Temporal dos Algoritmos

Posto tudo o que já foi apresentado, começaremos por analisar a complexidade temporal de cada algoritmo, individualmente.

Tabela 2 - Complexidade de cada Algoritmo (Kempe, 2004) (Sanan, Jain, & Kappor, 2013)

Algoritmo		Complexidade
Algoritmos Fluxo Máximo	Edmonds Karp	$O(VE^2)$
	Ford–Fulkerson	$O(E \max f)$
Algoritmos Caminho Mais Curto	Dijkstra	$O(E + V \log(V))$
	Bellman-Ford	$O(VE)$

Legenda da Tabela 2:

V → Corresponde ao número de Vértices (Vertex)

E → Corresponde ao número de Ligações (Edges)

f → Corresponde ao valor máximo do fluxo

2.3.3. Particularidades dos Algoritmos

Em relação aos algoritmos de Fluxo máximo, o algoritmo de Edmonds-Karp usa como base o de Ford–Fulkerson, contudo, aquele algoritmo tem uma pesquisa mais profunda, pois usa o BFS (Breadth-First Search) (Tarau, 2013).

Em relação aos algoritmos de caminho mais curto, o algoritmo Bellman-Ford diferencia-se do algoritmo de Dijkstra por conter pesos negativos.

2.3.4. Análise dos Algoritmos de Pesquisa

Existem dois tipos de pesquisa nos grafos, a pesquisa por profundidade e a pesquisa por largura. Por profundidade, existe a DFS (Depth-First Search) e por largura o BFS (Breadth-First Search).

Os algoritmos de DFS e BFS são aplicados em (Dooren, 2009):

- Sistemas de GPS;
- Redes Sociais;
- Na área das telecomunicações;
- Entre outras aplicações.

O BFS parte do vértice raiz, onde tudo começa e onde, no nosso caso, se encontram os Produtores. Depois, explora os vértices vizinhos, até que encontre o alvo da busca, isto é, todos os Consumidores (Gharehchopogh, Seyy, & Feyzipour, 2012).

O DFS parte do nó de raiz, os produtores, tal como o BFS, explorando tanto quanto possível cada um dos seus ramos, repetindo esta sequência até descobrir o seu alvo, os Consumidores (Gharehchopogh, Seyy, & Feyzipour, 2012).

2.4. Conclusões Gerais

Como podemos verificar através da complexidade temporal, o algoritmo de Dijkstra é mais rápido no processo de execução, logo pelos algoritmos de caminho mais curto seria o escolhido.

Ao analisarmos o subcapítulo anterior, chegamos claramente à conclusão que o melhor algoritmo a usar é o de Edmonds-Karp pela sua pesquisa mais eficaz, logo pelos algoritmos fluxo máximo seria o escolhido.

Entre as duas possibilidades, o Dijkstra apresenta um problema, pois não consegue avaliar toda a rede como um todo, escolhendo apenas o caminho mais curto entre os pontos A e B. Logo o algoritmo escolhido para este estudo é o Edmonds-Karp.

A necessidade de estudar o BFS e o DFS prende-se ao facto do primeiro ser usado pelo algoritmo EK, o escolhido para o estudo, e do segundo ser usado para complementar a presente pesquisa.

O Algoritmo de Edmonds-Karp (AEK) pode ser usado em (Ribeiro, 2015):

- Grafos com múltiplas origens e/ou múltiplos destinos;
- Fluxos máximos de água ou de eletricidade, caminhos onde se pretende maximizar o utilizador.

O AEK é usado para (Ribeiro, 2015):

- Encontrar o corte mínimo que separa o grafo em duas metades;
- Encontrar número de caminhos que não usem as mesmas arestas;
- Encontrar o maior emparelhamento num grafo bipartido;
- Entre outras aplicações...

3. Arquitetura

A arquitetura proposta baseada num contexto multiagente de modo a maximizar a capacidade do sistema. A autonomia conferida às entidades permite que estas reajam a mudanças durante a sua execução de forma auto-organizada.

3.1. Arquitetura do Sistema

A arquitetura tem, na sua constituição, um núcleo responsável pela execução do sistema. Como podemos observar na Figura 5, para além do núcleo, a arquitetura permite a interação entre o operador humano e esse mesmo núcleo. O trabalho realizado incidiu sobre todas as componentes desse mesmo núcleo.

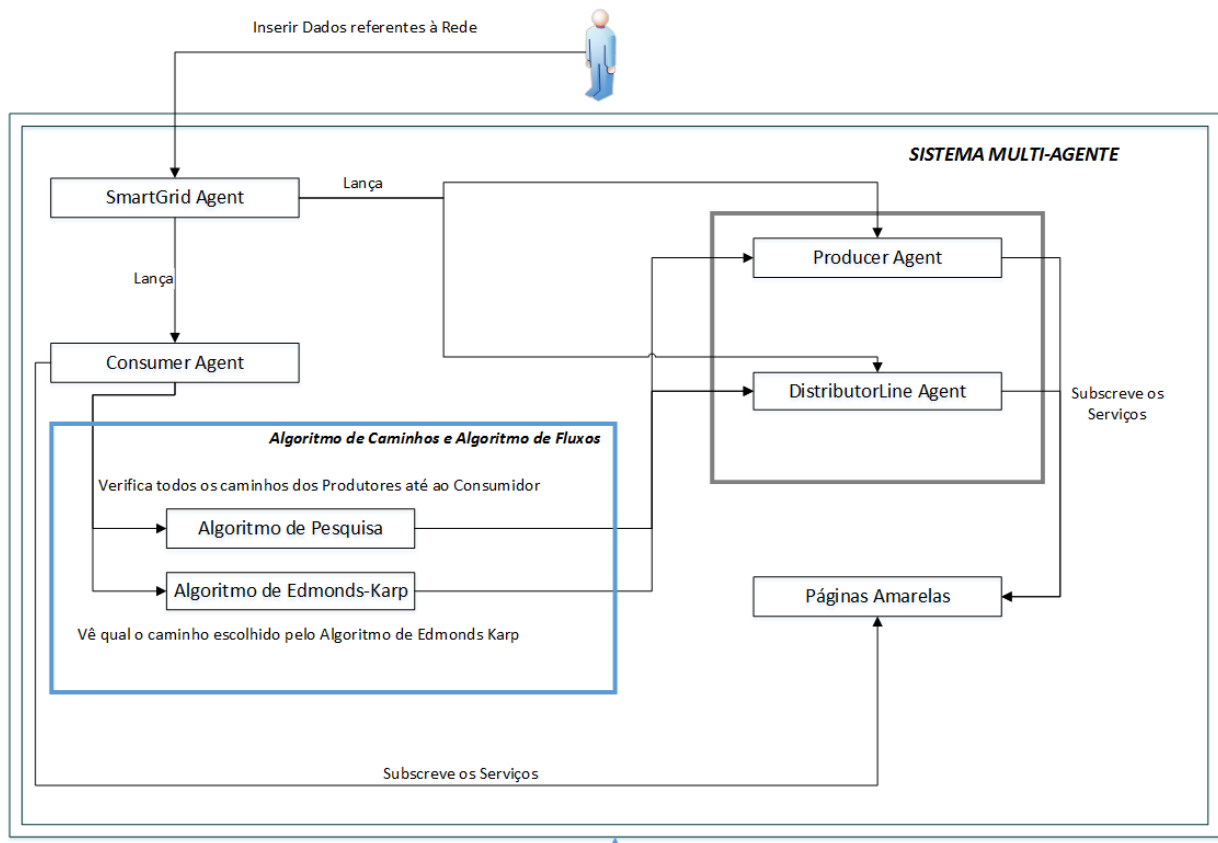


Figura 5 - Arquitetura do Sistema

Um ponto importante do sistema é o Consumer Agent (CA). Este agente recorre ao algoritmo de fluxo e ao algoritmo de caminhos para garantir que irá receber a energia que necessita.

Outra particularidade é a do sistema analisar constantemente toda a rede elétrica enquanto está em execução, o que implica que, ao remover ou adicionar novos nós, produtores, distribuidores ou mesmo consumidores, se auto-organizem e se auto-atualizem.

Na fase inicial, basta inserir as informações da rede elétrica, nós existentes, as ligações que estão presentes e os valores de energia de cada um.

O utilizador pode, em tempo real, visualizar o que está a ser realizado pelo sistema bem como quem está a fornecer energia e a quem a está a fornecer.

De um ponto de vista funcional, o papel de cada agente é descrito na Tabela 3.

Tabela 3 - Agentes e as suas funções

Grupo	Classes	Função
Agentes	Producer Agent (PA)	Agente responsável por abstrair um produtor, cujas características são a energia máxima e os nós a que está ligado.
	DistributorLine Agent (DLA)	Agente responsável por abstrair um posto de distribuição, cujas características são a energia máxima e os nós a que está ligado.
	Consumer Agent (CA)	Agente responsável por abstrair um consumidor de energia, cujas características são a energia máxima e os nós a que está ligado.
Caminhos	Algoritmo de Pesquisa	Algoritmo responsável por calcular todos os caminhos desde o produtor até ao consumidor, identificando todos os caminhos possíveis desde os produtores até aos consumidores.
Fluxos	Algoritmo Edmonds-Karp (AEK)	Algoritmo de fluxos que calcula o caminho entre o produtor e o consumidor.

3.2. Características dos Agentes

Os agentes presentes neste sistema expressam as suas funcionalidades em fornecer ou receber energia. Note-se que todo o processo de distribuição de energia contém toda a informação necessária para o transporte de energia. Na Tabela 4 explica-se detalhadamente cada argumento dos Agentes.

Tabela 4 - Parâmetros dos Agentes

Parâmetro	Definição
ID	ID é composto pelo nome do Agente.
Tipo de Agente	<p>O Agente pode ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Producer Agent ○ DistributorLine Agent ○ Consumer Agent <p>Define-se o Tipo de Agente consoante a sua função.</p>
Nós de Ligação	Os Nós de Ligação são todos aqueles que vão para o Agente e todos os que saem do Agente.
Energia	Valor Máximo de Energia que esse Agente (Nó) consegue passar.

3.3. Representação Lógica

No grafo resultante da representação lógica, os produtores, consumidores e postos de distribuição são representados como os nós do grafo e os ramos constituintes dos nós do grafo são representados como as ligações entre eles.

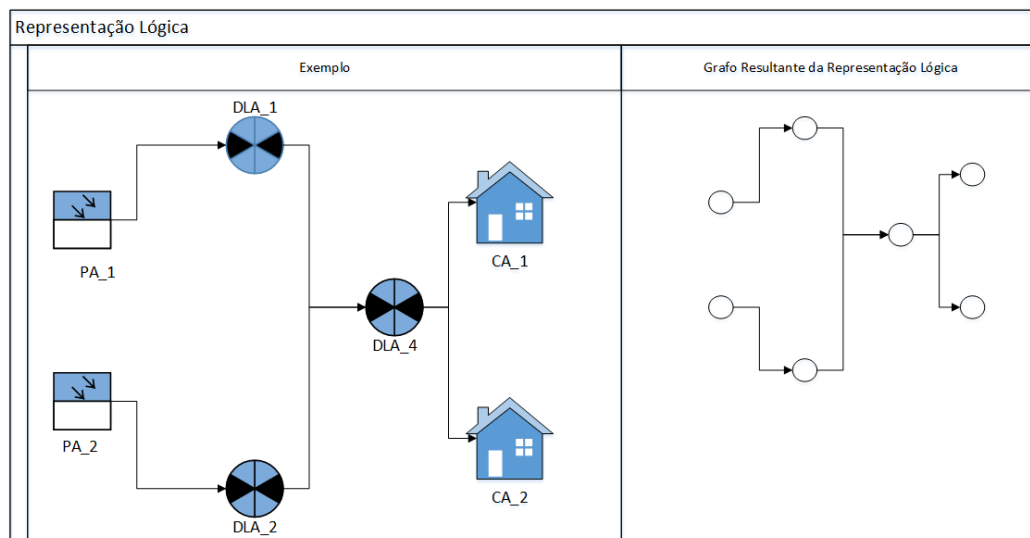


Figura 6 - Representação Lógica a partir de um exemplo

Na arquitetura, todo o grafo é bidirecional. Esta é composta por vários produtores: PA_1 e PA_2, com diversos distribuidores: DLA_1, DLA_2 e DLA_4 e por fim vários consumidores: CA_1 e CA_2. Logo, embora a energia corra apenas no sentido dos produtores até aos consumidores, a arquitetura pode acionar várias ligações entre os nós simultaneamente. A escolha do melhor caminho para a energia é feita através destas ligações simultâneas com base em algoritmos que irão tomar essa decisão.

3.4. Consumer Agent

O consumer agent é o agente fulcral desta arquitetura, pois não só é ele que inicia as comunicações com os outros agentes, como é para ele que toda a arquitetura está desenhada, como referido anteriormente.

A Figura 7 apresenta todo o esquemático e funcionamento do Consumer Agent (CA). O algoritmo Path será abordado aquando da menção do algoritmo de pesquisa.

O CA inicia a comunicação com os agentes que se encontram no algoritmo de pesquisa, ou seja, em todos os caminhos desde os produtores até si mesmo. Depois, o AEK toma a decisão de quem é que vai fornecer energia.

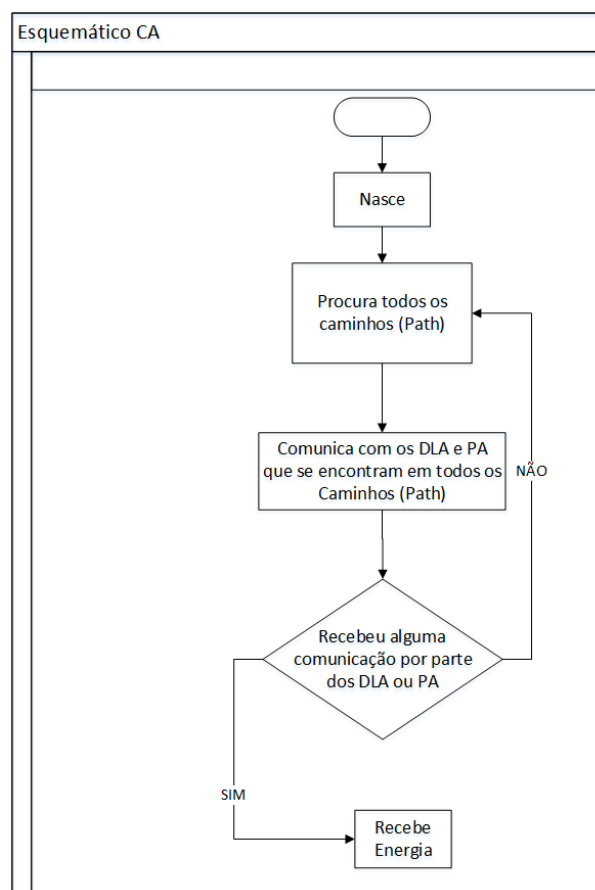


Figura 7 - Esquemático do CA

3.5. Producer Agent e DistribuidorLine Agent

A Figura 8 representa o esquemático e funcionamento destes agentes.

Ficam à espera da comunicação feita pelo consumidor e, posteriormente, ao recebê-la, verificam pelo AEK se têm ou não que lhe fornecer energia. São agentes mais simples que os agentes consumidores mas igualmente fulcrais para a produção e transporte de energia.

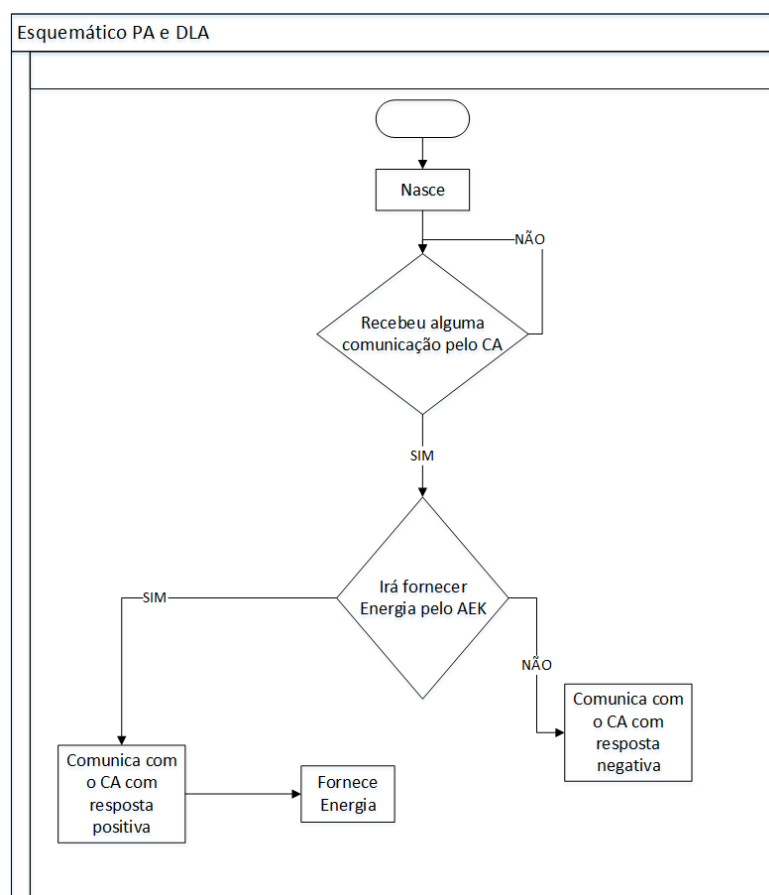


Figura 8 - Esquemático de funcionamento PA e DLA

3.6. Algoritmo de Pesquisa

3.6.1. Necessidade de usar o Algoritmo

A necessidade de usar o Algoritmo de Pesquisa justifica-se pelo objetivo traçado de analisar todos os caminhos que existem entre os produtores e os consumidores. Neste caso, o referido algoritmo foi usado com recurso a Depth-First Search (DFS) para os agentes. É um algoritmo que complementa o algoritmo de AEK porque o trabalho conjunto dos dois permitirá uma observação completa de todo o sistema a partir de diferentes tipos de análise, tornando toda a arquitetura mais dinâmica e com maior potência para que os nós envolvidos sejam escaláveis.

3.6.2. Funcionamento do Algoritmo

O funcionamento do algoritmo de pesquisa, o DFS é representado na Figura 9. Como já referido no subcapítulo 2.3.4.

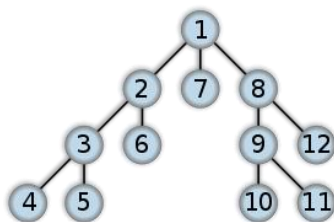


Figura 9 - Ordem de funcionamento do algoritmo DFS

3.6.3. Esquemático do Algoritmo

Como indicado na Figura 10 podemos visualizar o momento em que é adicionado ou removido um nó ou ligação.

O momento em que o algoritmo é executado, é exatamente antes de o consumidor começar a comunicar com os restantes produtores e distribuidores. Quando o consumidor necessita de comunicar com os outros agentes que possam fornecer ou distribuir energia, chama o algoritmo de pesquisa, para ter conhecimento de todos os caminhos.

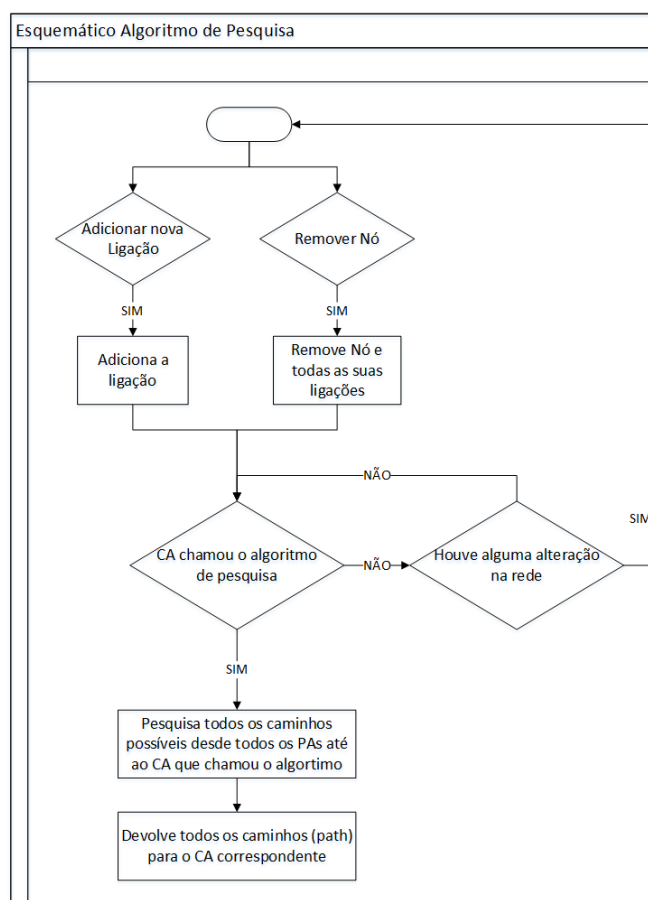


Figura 10 - Esquemático do Algoritmo de Pesquisa

Como se pode calcular, torna-se importante o auxílio deste algoritmo para as comunicações a serem efetuadas pelos consumidores.

3.7. Algoritmo de Fluxos

3.7.1. Impacto da Energia no Algoritmo

Dois dos critérios para a escolha do algoritmo a usar neste estudo são a importância da energia que contem e a capacidade de entrega da energia ao consumidor independentemente do ponto de origem de forma que o consumidor nunca fique sem energia. Estes critérios levaram à escolha do AEK que é um algoritmo de fluxos que consegue recalculer todo o sistema de energia tal como já foi referido. O AEK foi desenhado para otimizar a energia fornecida ao consumidor. O uso deste algoritmo na arquitetura desenhada otimiza ainda mais a energia a fornecer, fazendo uma gestão acertada dos locais para onde envia energia.

3.7.2. Funcionamento do Algoritmo

O AEK baseia a sua pesquisa no Breadth-First Search (BFS), a partir do qual procuramos o caminho mínimo em termos de ligações e não de “custo”, como é o funcionamento do algoritmo de Dijkstra.

Ordem de funcionamento do Algoritmo:

- Obtém o fluxo máximo na rede;
- Analisa o valor do nó “S” (valor total dos produtores) e do nó “T” (valor total dos consumidores);
- Verifica pelo caminho mais curto a passagem de energia.

O funcionamento do algoritmo de pesquisa, o BFS é representado na Figura 11. Como já referido no subcapítulo 2.3.4.

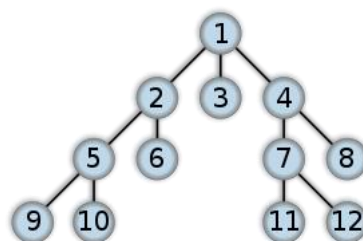


Figura 11 - Ordem de funcionamento do algoritmo BFS

Se tivermos múltiplas origens e múltiplos destinos, o que o algoritmo faz é criar um super nó “S” que liga todas as origens e um super nó “T” que liga todos os destinos. Assim, sabemos a quantidade de energia necessária para ir de “S” a “T”. Tal descrição salienta a característica bipartida da rede que possui várias origens e vários destinos, tal como representado na Figura 12.

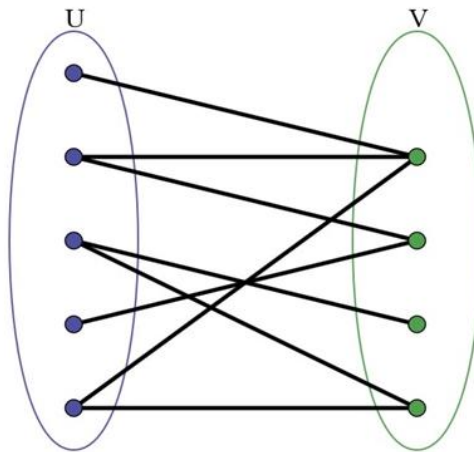


Figura 12 - Grafo Bipartido (GeeksforGeeks, 2015).

Agora centremo-nos nos super nós e no seu significado. O super nó “S” significa origem (source) e o super nó “T” significa destino (sink), como descrito na Figura 13.

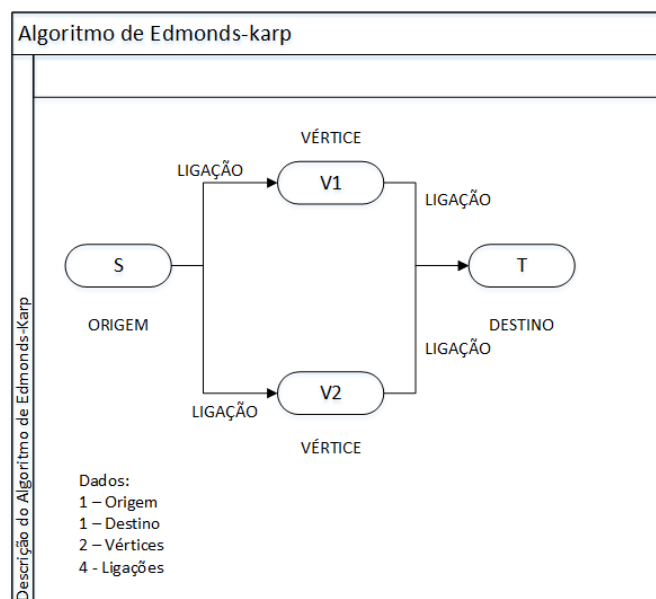


Figura 13 - Descrição do Edmonds-Karp

3.7.3. Esquemático do Algoritmo

Na Figura 14 podemos observar o esquemático do AEK e o seu modo de funcionamento. Como podemos observar o algoritmo divide-se em duas partes. Uma a servir de ligação entre as alterações da rede com o core do algoritmo e a outra parte é a parte que irá tratar do calcular o fluxo.

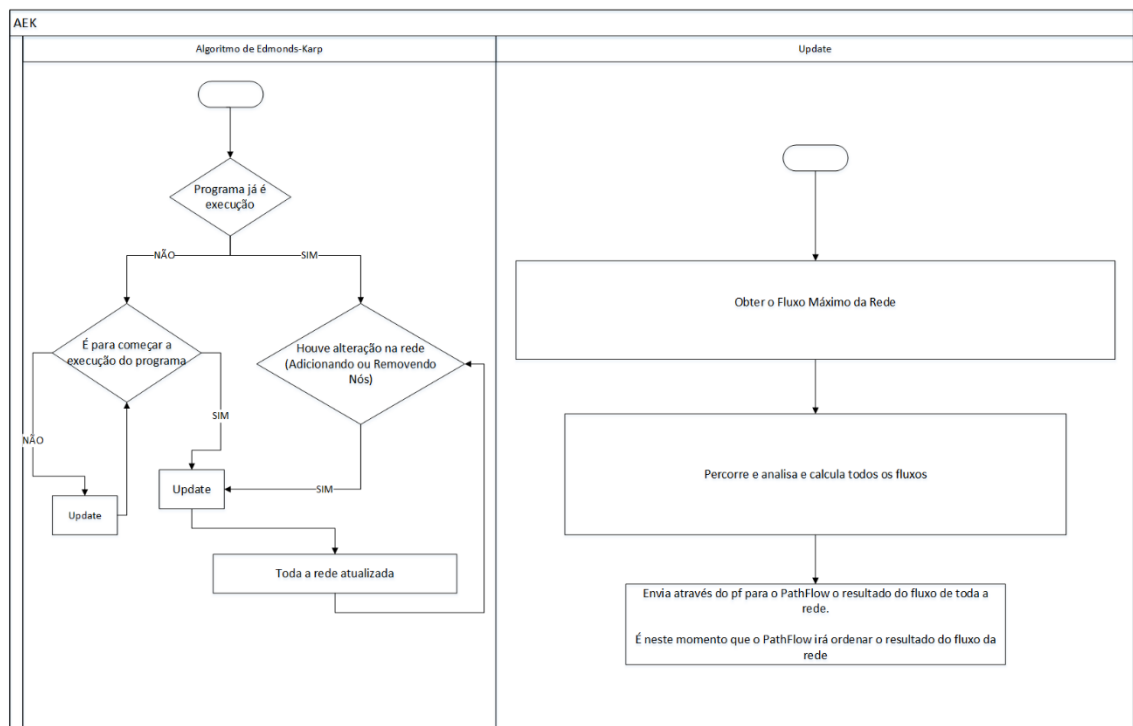


Figura 14 - Esquemático Algoritmo de Fluxos

3.8. Adicionar ou Remover Nós

A arquitetura suporta que, em qualquer altura da execução, um nó possa ser removido ou adicionado ao sistema com diferentes ligações e com diferentes energias. O sistema deverá ter a capacidade de se auto-organizar e de auto-atualizar de forma a maximizar todo o fluxo de energia da rede.

A remoção e adição de nós é possível de ser executada num momento prévio ao do corrimento do sistema ou mesmo durante a sua execução.

Com os sensores a monitorizar cada nó, o sistema é facilmente capaz de saber se existem novos nós ou se algum foi removido.

Como podemos ver na Figura 15 o adicionar ou remover nós é bastante simples. Começa por verificar se está em execução ou não, e consoante essa resposta os algoritmos atualizam e enviam ou não informações para outras componentes da arquitetura.

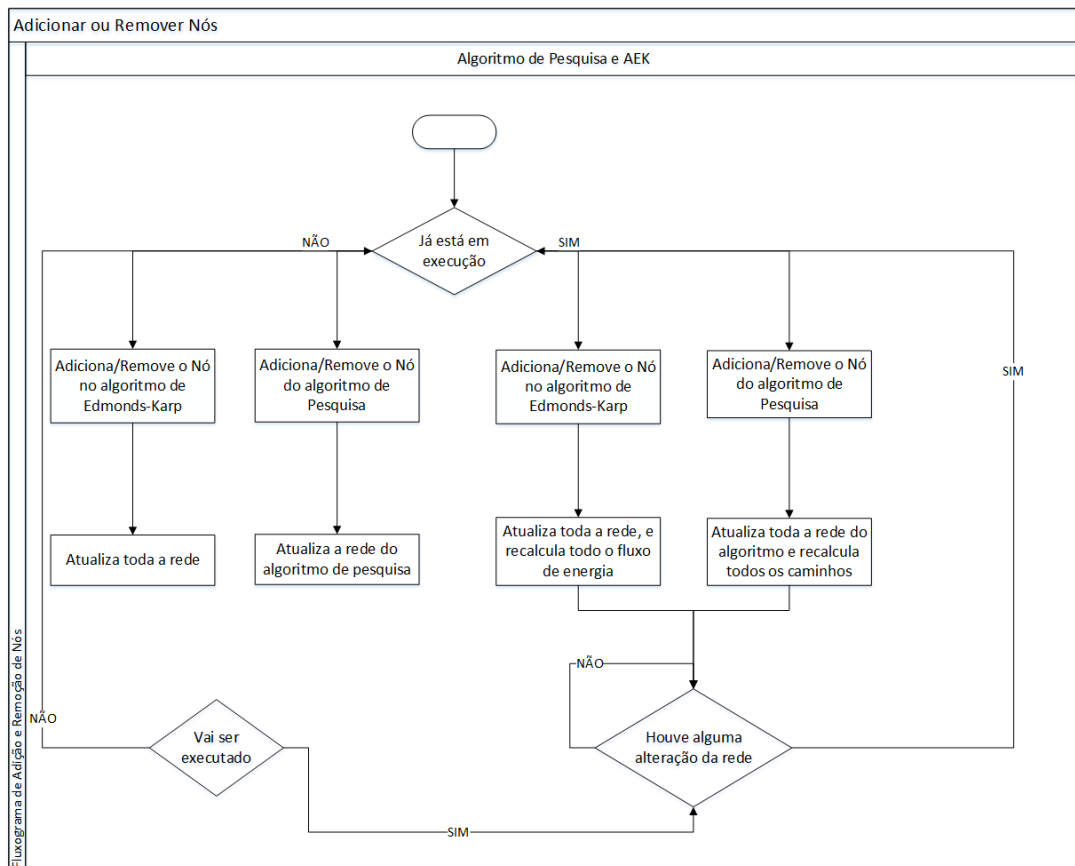


Figura 15 - Adicionar ou Remover Nós

4. Implementação

Para a implementação da arquitetura proposta recorreu-se à linguagem de programação Java em conjunto com a framework, Java Agent Development Framework (JADE) (Bellifemine, Caire, & Greenwood, 2004).

4.1. Consumer Agent

O esquemático relativo ao Consumer Agent (CA) está descrito na Figura 16.

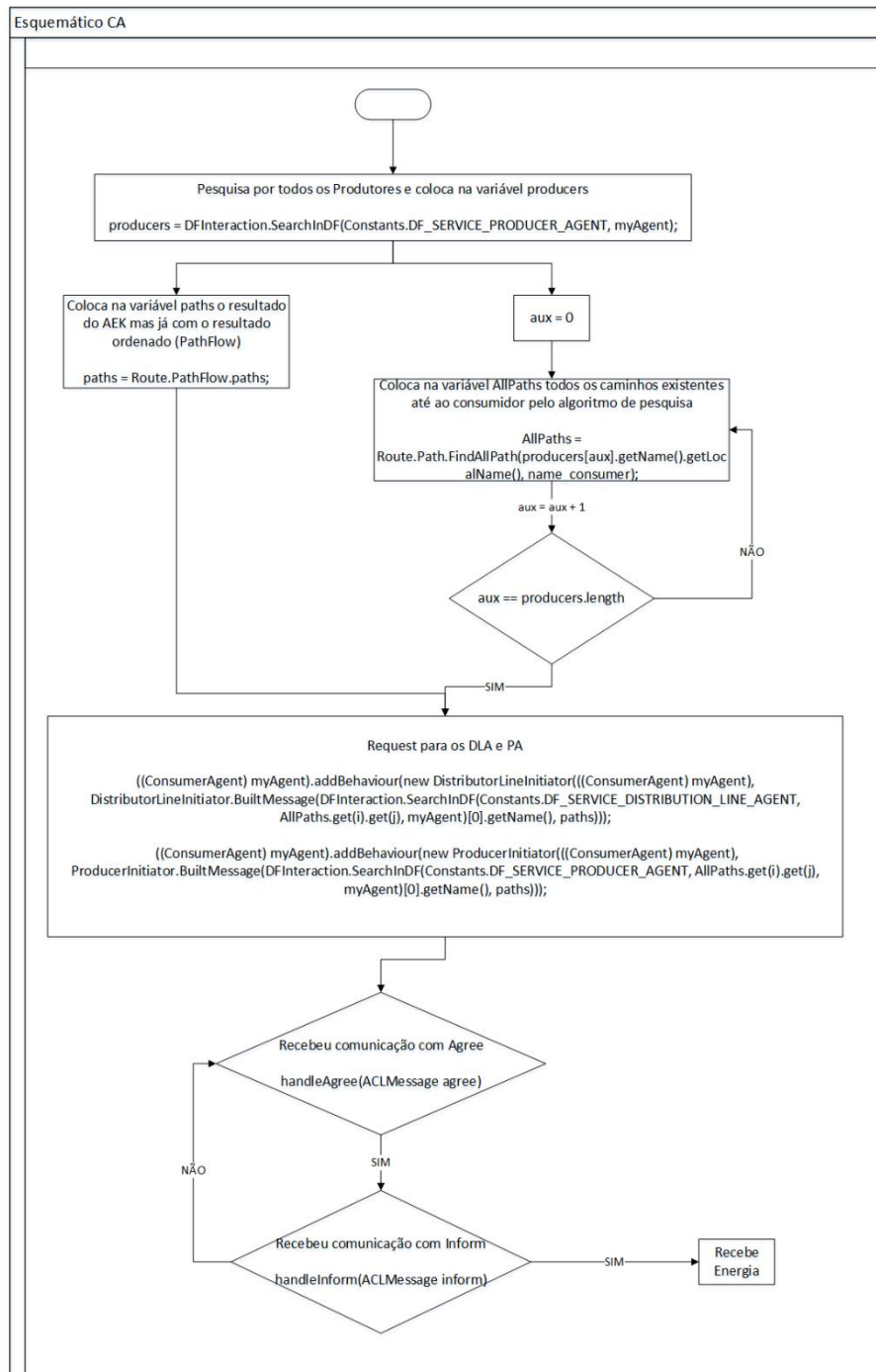


Figura 16 - Esquemático do CA

Olhando para a Figura 16 deparamos que o consumidor é o agente que inicia as comunicações com os restantes agentes produtores e distribuidores. Também é o agente onde onde chama o método de decisão, neste caso o Algoritmo Edmonds-Karp (AEK), e onde através dele conseguimos obter o resultado do fluxo.

4.1.1. Execução

As interações entre cada um dos intervenientes neste processo, necessárias para que se consiga alcançar os objetivos deste estudo, estão descritas no diagrama de sequência da Figura 17.

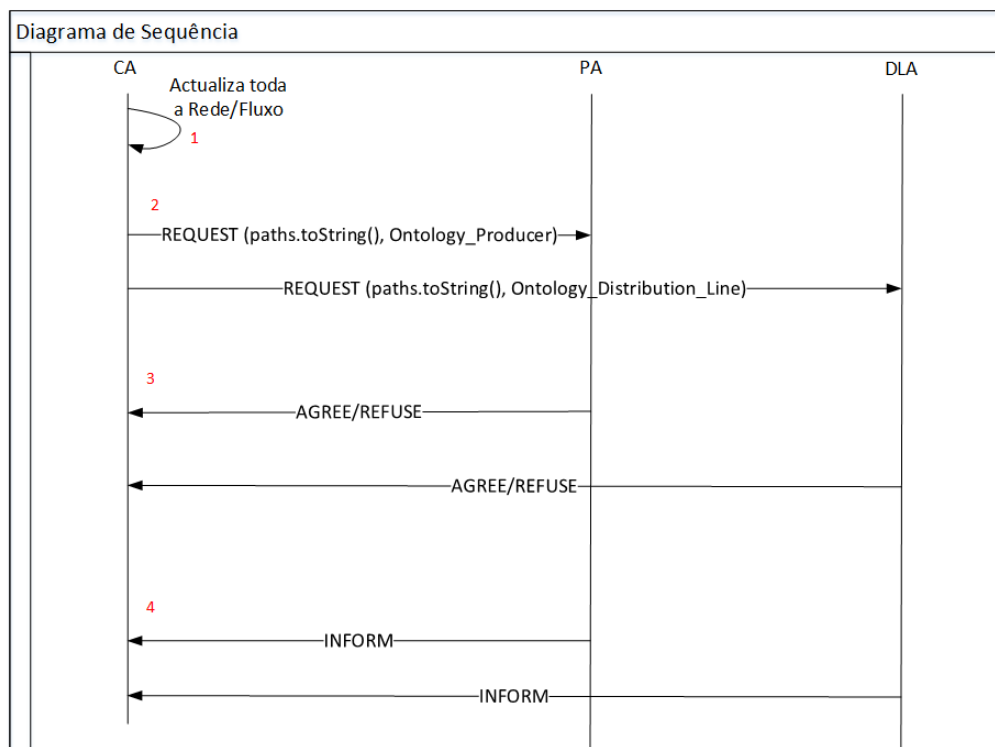


Figura 17 - Diagrama de Sequência

O protocolo utilizado para a troca das mensagens entre agentes foi o FIPARquest (Bellifemine, Caire, & Greenwood, 2004). Nas mensagens foram usados as performativas Request (Bellifemine, Caire, & Greenwood, 2004), Agree (Bellifemine, Caire, & Greenwood, 2004) ou Refuse (Bellifemine, Caire, & Greenwood, 2004) e, por fim, Inform (Bellifemine, Caire, & Greenwood, 2004).

No ponto assinalado como 1, visualiza-se a atualização de toda a rede, usando o Algoritmo Edmonds-Karp (AEK) como método de decisão.

No ponto assinalado com 2, o consumidor comunica com os produtores e distribuidores, transmitindo uma mensagem que conterá a quantidade de energia que o mesmo necessita e o caminho decidido pelo AEK.

No ponto 3, encontram-se os produtores e distribuidores. É neste ponto que o algoritmo de fluxos decide quem irá fornecer e quem irá distribuir a energia. Sendo o algoritmo que toma a decisão, logo haverá uns agentes que responderão agree e os restantes que responderão refuse.

Por fim, no ponto 4 do diagrama de sequência, os produtores e os distribuidores enviam uma mensagem que informa o consumidor que lhe estão a fornecer energia.

4.1.2. Behaviours

Existe uma característica muito importante a ter em atenção durante a implementação do behaviour que suporta o cálculo do fluxo: com o elevado número de comunicações e de pedidos para atualizar a rede, o que acontecerá com muita frequência, esta atualização não poderá bloquear o restante processamento.

De modo a que este behaviour não bloqueasse o agente, recorreu-se a um TickerBehaviour (Bellifemine, Caire, & Greenwood, 2004) com um intervalo baixo entre tickers. Para apurar se a execução do AEK está a decorrer, consultou-se a variável booleana run.

O motivo pela escolha do TickerBehaviour prende-se pelo facto de analisar todo o sistema de segundo a segundo. O TickerBehaviour responsável está representado na Figura 18.

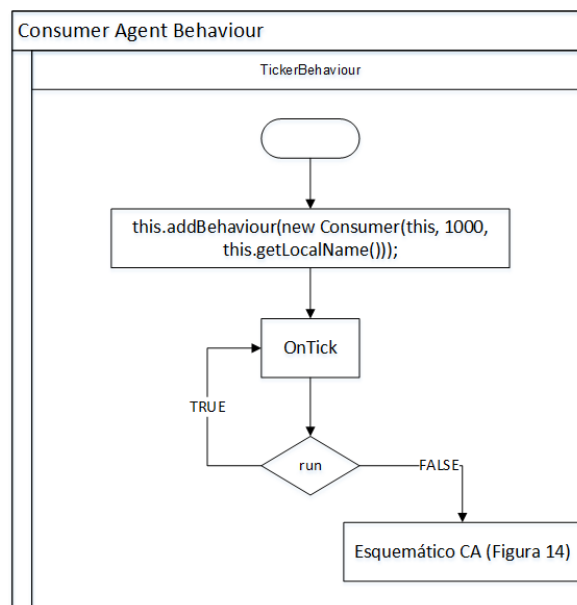


Figura 18 - Behaviour responsável pela comunicação e pela actualização da rede

Este behaviour é acionado assim que o agente inicia a sua execução, com um intervalo de 1000 milissegundos entre “tickers”. Este valor foi ajustado de forma a ser curto o suficiente para uma rápida atualização da rede sem que o desempenho da execução do agente seja prejudicado.

De forma a tornar possível o fluxo de energia pela rede durante a execução do AEK, este só é atualizado aquando do término do seu cálculo, deixando a versão anterior como base das tomadas de decisão. No caso de ocorrência de um bloqueio, ao qual se chamou de estado intermédio, a atualização terá como base de decisão a versão anterior.

4.2. Producer Agent e DistributorLine Agent

A Figura 19 representa o esquemático dos Producer Agent (PA) e DistributorLine Agent (DLA). Como podemos observar mal haja a primeira comunicação vinda do consumidor, os agentes irão responder consoante o AEK.

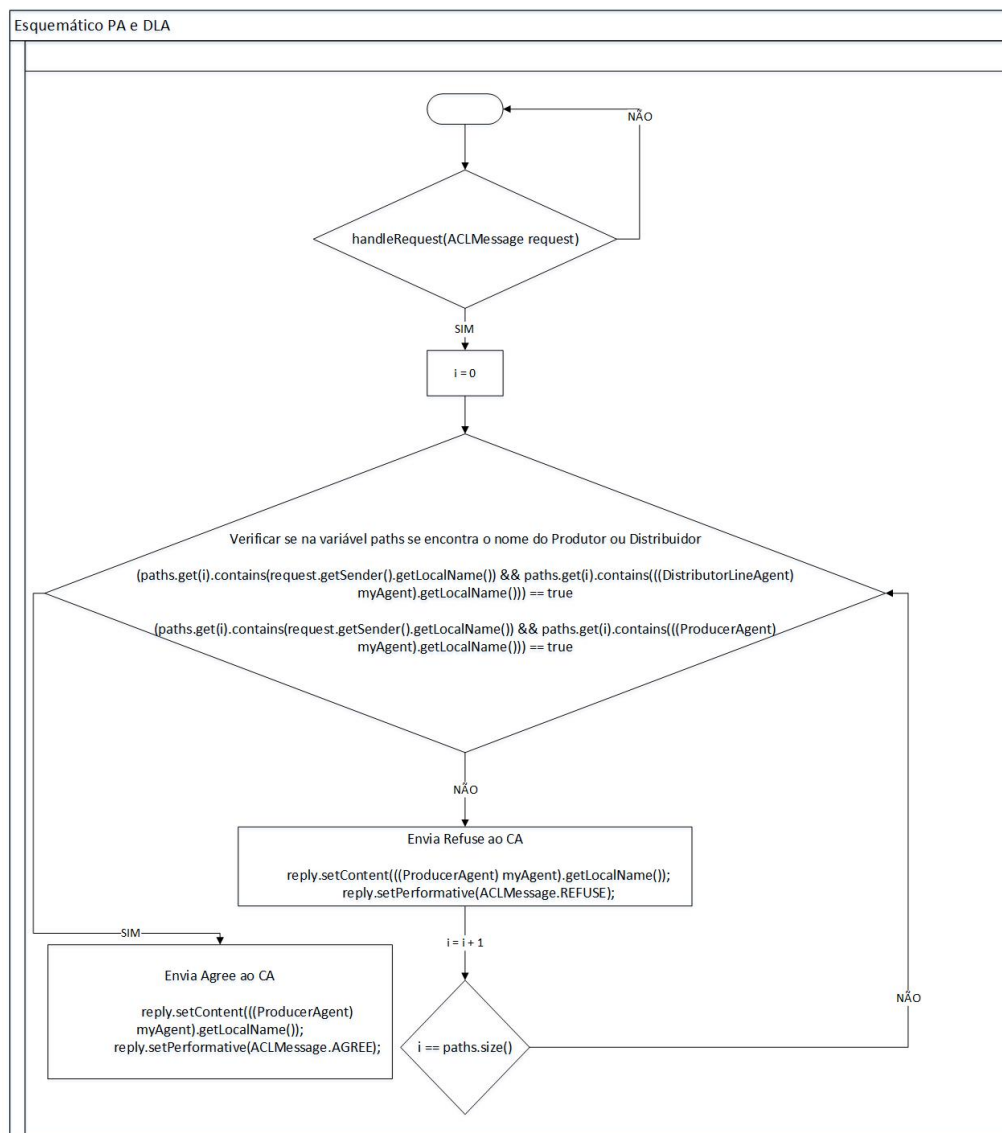


Figura 19 - Esquemático do PA e DLA

4.2.1. Conteúdo da mensagem do Consumidor

Quando o consumidor envia uma mensagem de request, esta tem parâmetros, tais como:

- AID;
- Lista de Strings pelo AEK;
- Valor de Energia do Consumidor.

O AID é o identificador do agente, é importante para sabermos com quem comunicar. O caminho escolhido pelo AEK é uma lista de String que compreende o caminho escolhido até aquele específico consumidor. Esta mesma Lista de String contém todos os AID de todos os agentes responsáveis pelo transporte de energia para aquele consumidor específico.

4.3. Algoritmo de Pesquisa

Como já foi explicado nos subcapítulos anteriores, o algoritmo de pesquisa é fundamental para a nossa arquitetura.

Uma das vantagens da implementação deste algoritmo, para além de auxílio da nossa arquitetura, é a de ser um algoritmo leve - como é constantemente usado -, não levando o sistema a usar recursos desnecessários.

Os caminhos são adicionados no momento em que o utilizador coloca no algoritmo todos os nós com as suas respetivas ligações. A partir desse momento, e quando já se encontra no TicketBehaviour do consumidor, começa a executar a sua pesquisa.

4.3.1. Fluxograma

Na Figura 20, na qual está representado o fluxograma do algoritmo de pesquisa, podemos averiguar como funciona. Ao ser chamado pelo consumidor o algoritmo irá percorrer todos os caminhos até ao mesmo consumidor, e irá adicionar nas listas. Cada trajeto de um produtor até ao consumidor corresponde a uma lista, na qual e no final para simplificarmos unimos as listas numa só. Depois de calcular os caminhos o algoritmo retorna para o consumidor a variável routes, na qual contém essa mesma listagem de caminhos.

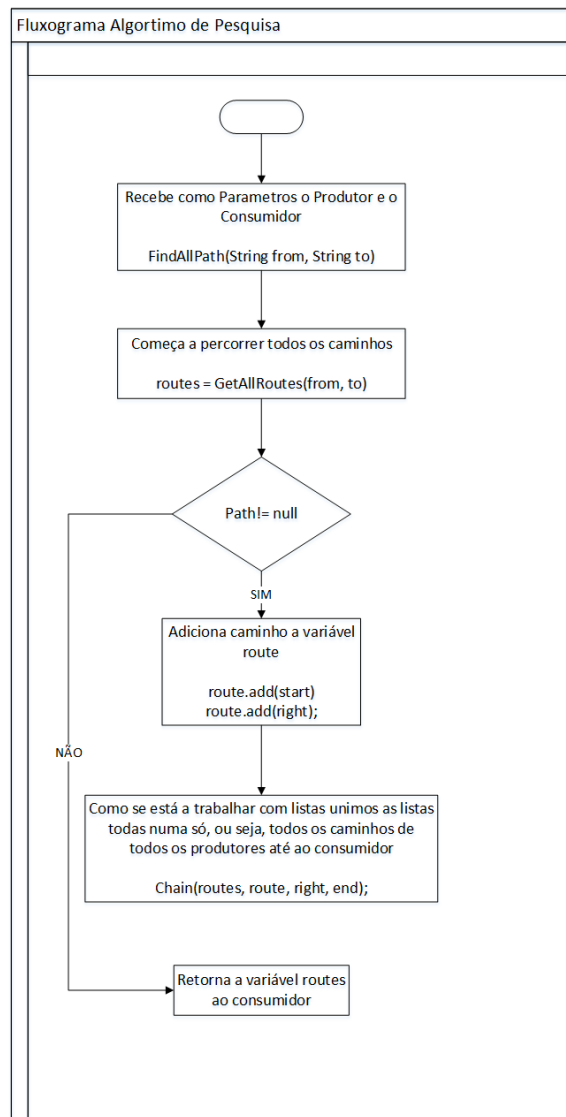


Figura 20 - Fluxograma do Algoritmo de Pesquisa

4.4. Algoritmo de Fluxos

O principal algoritmo da arquitetura é fulcral ao método de decisão do fluxo de energia de toda a rede. Verificou-se que é bastante ágil e bastante eficiente no tratamento de energia, uma vez que o tempo de atualização é muito rápido. Estes valores serão descritos no capítulo seguinte.

4.4.1. Fluxograma

No fluxograma do AEK, com a componente de visualização ativa, verificamos que este precisa de ter uma ordem para executar a visualização do processo.

O Update é usado sempre que se adicionam ou se removem nós. A sua única particularidade é executar a atualização quer a componente de visualização esteja ativa quer não. Esta componente de Update é fulcral pois ordena a pesquisa de toda a rede que percorre todos os nós e recalcula todo o

fluxo de energia, sendo por isso, importante a definição do nó “S” e “T”. O recálculo de toda a energia está representado na Figura 21.

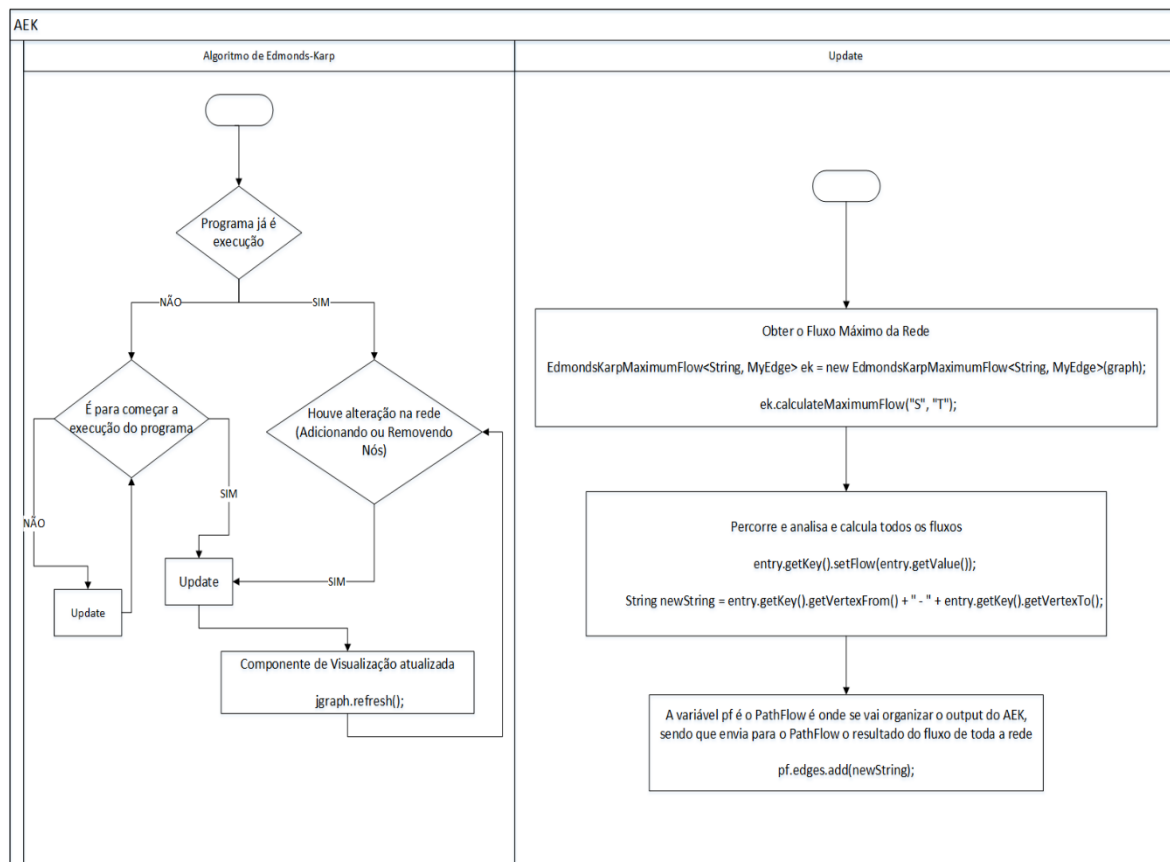


Figura 21 - Fluxograma AEK

Posteriormente, e uma camada mais acima, encontra-se a componente que ativa a visualização e/ou a execução. Neste estudo, e no fluxograma, a componente tem o nome de Algoritmo de Edmonds-Karp. Contudo, pertence ao mesmo algoritmo. Simplesmente foi dividido para maior controlo do mesmo.

4.4.2. Componente de Visualização do Algoritmo

Ao algoritmo foi adicionada uma componente de visualização, através da qual se pode verificar toda a rede e a sua energia, como demonstrado na Figura 23.

Neste exemplo encontramos um produtor com cinco postos de distribuição e dois consumidores e, como podemos verificar pelo AEK, decidiu-se apenas passar toda a energia pelo mesmo caminho. Os valores à direita de cada ligação indicam o valor máximo dessa mesma ligação.

Decidiu-se adicionar esta componente para uma visualização concreta do fluxo de energia, pois o simples facto de conseguir visualizá-lo mal haja uma alteração do sistema torna tudo muito mais simples.

Antes de passarmos para a componente de visualização, abordemos a Figura 22, que é importante para percebermos a que é que cada componente corresponde.

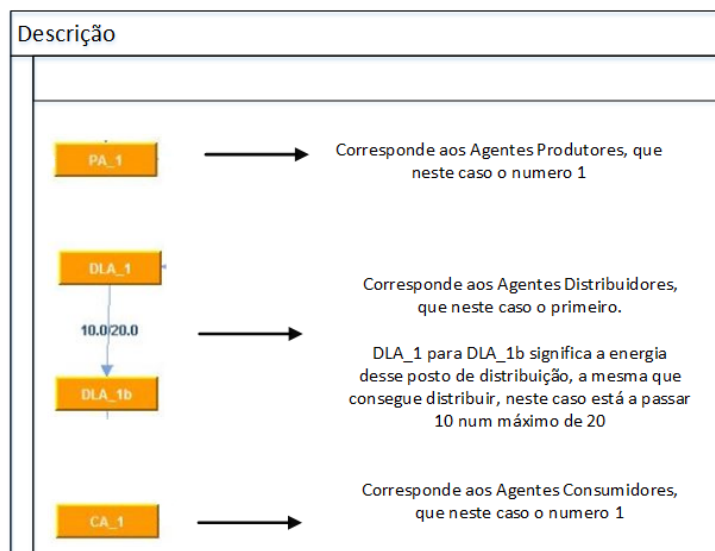


Figura 22 - Descrição dos componentes da visualização

Agora, sim, na Figura 23 veremos o funcionamento da componente.

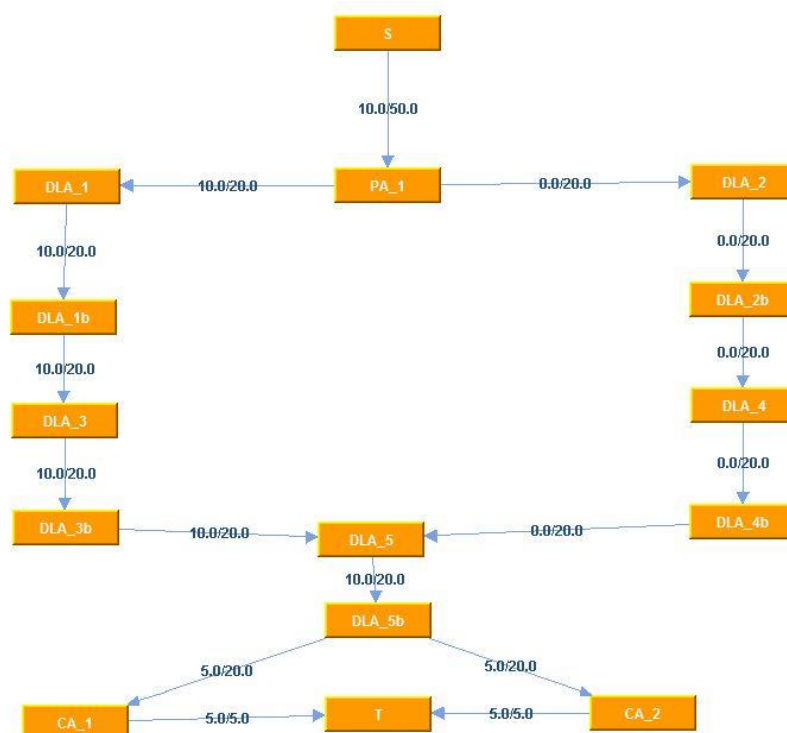


Figura 23 - Ferramenta de visualização do AEK

A componente de visualização não é obrigatória uma vez que toda a arquitetura funciona sem esta componente. Apenas foi criada para podermos visualizar o processo. Contudo, e como é óbvio,

sendo uma componente gráfica, irá sempre necessitar de um pouco mais de recursos, embora não sejam relevantes.

4.4.3.Particularidades

Foi realizado um algoritmo adicional em java, cujo nome é PathFlow, para o AEK, pois o output do caminho não vem ordenado. Como tal, decidiu-se ordenar o output para poder analisar os resultados num ficheiro.

Para além de ordenar, o algoritmo adicional também elimina erros de interface, ou seja, as ligações com null são eliminadas pois são erros de interpretação do próprio algoritmo e, como tal, não são relevantes para a arquitetura.

A Figura 24 apresenta a interação entre o AEK e este algoritmo adicional.

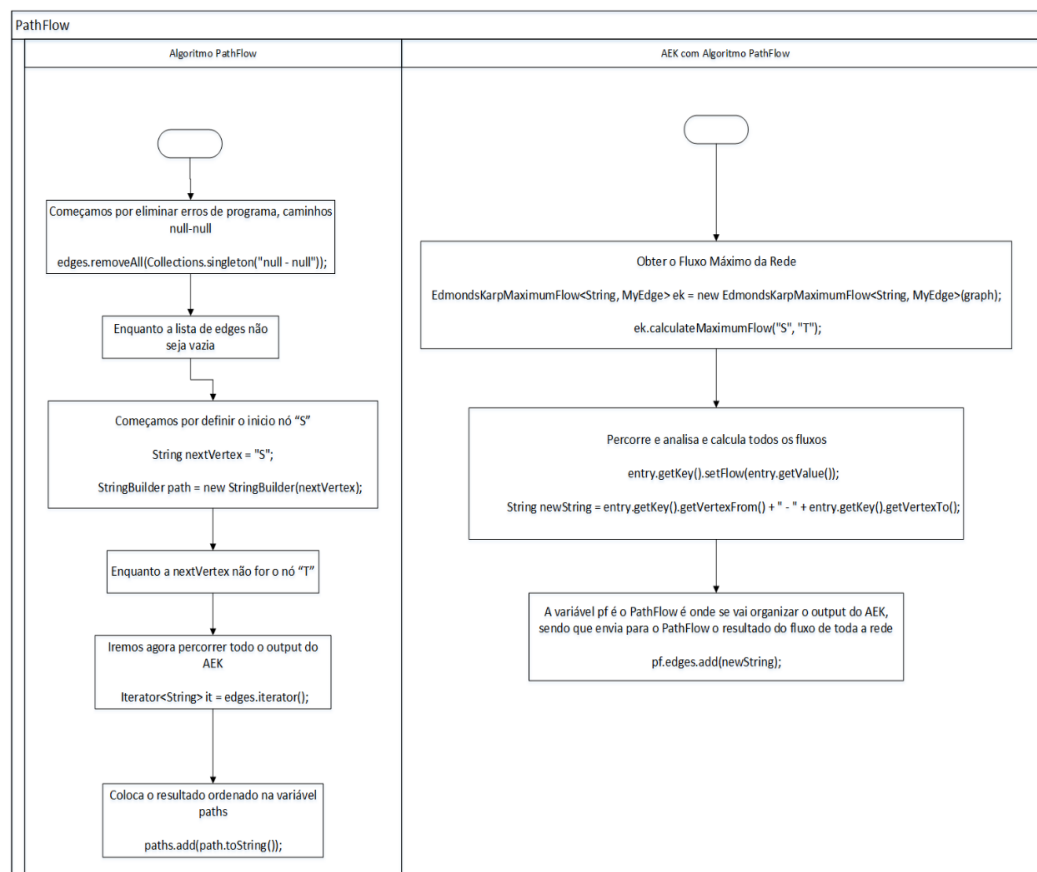


Figura 24 - Algoritmo PathFlow e AEK juntamente com o PathFlow

Pode-se ver o algoritmo sozinho, como se apresenta e a interação que efetua com o AEK e através da qual conseguimos perceber realmente a utilidade do mesmo, pois sem ele não podíamos exportar os dados para ficheiros de recolha de dados.

5. Validação e Testes

5.1. Sistema Virtual

De forma a poder testar a plataforma, recorreu-se a um ambiente virtual e simulado visto não ser possível a aplicação prática.

5.1.1. Testes e Simulação do Sistema

Para os testes foram feitas três simulações, uma com sete nós, outra com vinte nós e uma final com quarenta e dois nós. O objetivo da realização de três simulações é verificar o comportamento do sistema em diferentes ambientes e com diferentes requisitos.

Na Figura 25 estão definidos e representados os símbolos que irão ser usados para todas as simulações.

Nas tabelas deste capítulo não são mencionados os valores das linhas, pois todas contêm um valor constante de vinte para todas as ligações entre nós.

Todas as alterações realizadas nas três simulações foram efetuadas enquanto o sistema estava em execução, o que nos permitirá analisar as suas mudanças e o comportamento da arquitetura.

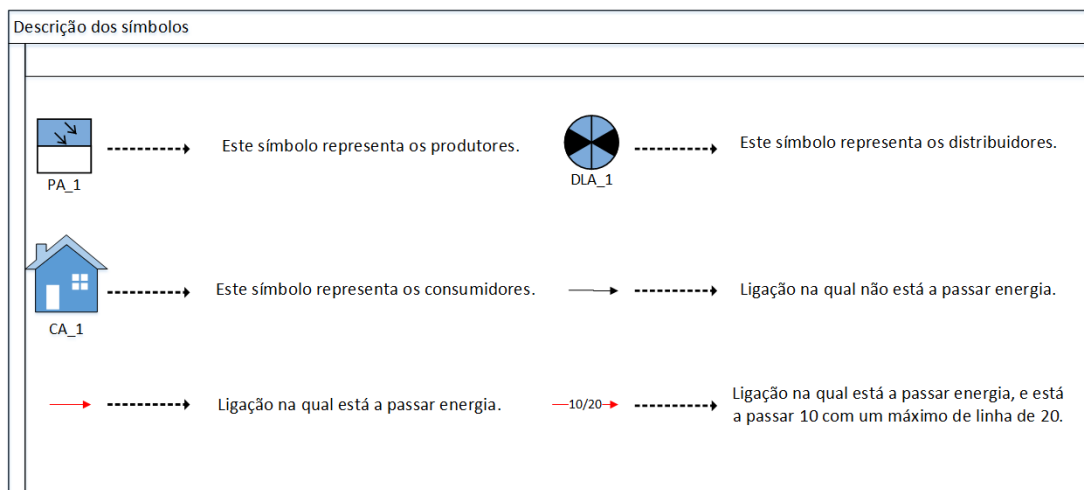


Figura 25 - Descrição dos símbolos

5.1.1.1. Primeira Simulação

Na primeira simulação, o sistema é composto pelos seguintes componentes:

- 2 Produtores;
- 3 Postos de Distribuição;
- 2 Consumidores.

Na Tabela 5, pode-se observar os valores de energia de cada componente e em que situação se encontram os componentes relativamente ao estado inicial.

Tabela 5 - Informações sobre cada componente

Identificador	Tipo de Agente	Estado	Energia
PA_1 e Pa_2	Producer Agent	Inicial	50
DLA_1, DLA_2 e DLA_3	DistributorLine Agent	Inicial	20
CA_1 e CA_2	Consumer Agent	Inicial	5
DLA_4 e DLA_5	DistributorLine Agent	Futuro	20

O exposto na Tabela 5 transmite o cenário inicial do estudo. Este sofrerá alterações ao longo do teste, como indica a Figura 26.

A primeira alteração sofrida foi a remoção do posto de distribuição DLA_1. A segunda alteração sofrida foi a adição de um posto de distribuição DLA_4. Depois, repetiu-se o processo, removendo o posto DLA_2 e, mais tarde, adicionando o posto DLA_5. Todas estas alterações introduzidas no sistema permitiram visualizar as mudanças que o mesmo sofre. As mudanças podem ser observadas nas seguintes figuras.

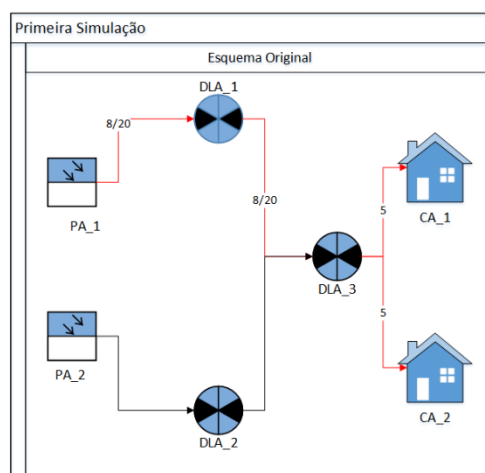


Figura 26 - Primeira Simulação - Esquema Original

Na Figura 26 representa o estado original na primeira simulação, e pode-se observar o fluxo de energia.

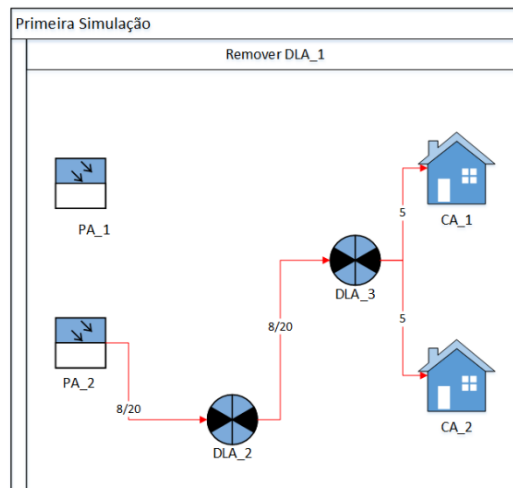


Figura 27 - Primeira Simulação - Remoção do Nó DLA_1

Como podemos verificar pela Figura 27 ao removermos o nó DLA_1 o sistema atualizou passando a energia para o nó DLA_2 a energia correspondente ao nó DLA_1.

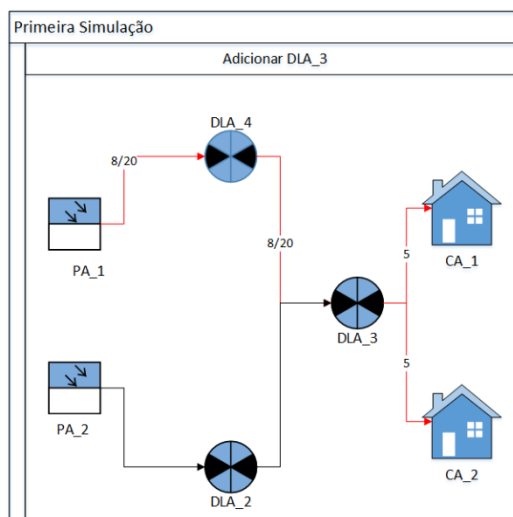


Figura 28 - Primeira Simulação - Adição do Nó DLA_3

O nó DLA_4 tem as seguintes ligações:

- PA_1 para DLA_4;
- DLA_4 para DLA_3.

Ao adicionarmos o nó DLA_4, o sistema optou pela passagem de energia pelo mesmo nó, sendo que o nó DLA_2 deixou neste momento de distribuir energia, como se pode visualizar pela Figura 28.

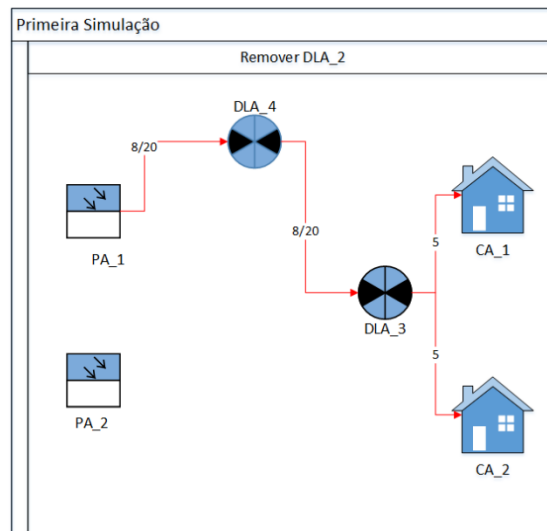


Figura 29 - Primeira Simulação - Remoção do Nó DLA_2

Como a remoção do nó DLA_2 não afetava a energia para os consumidores, o sistema não teve que fazer qualquer alteração de distribuição de energia.

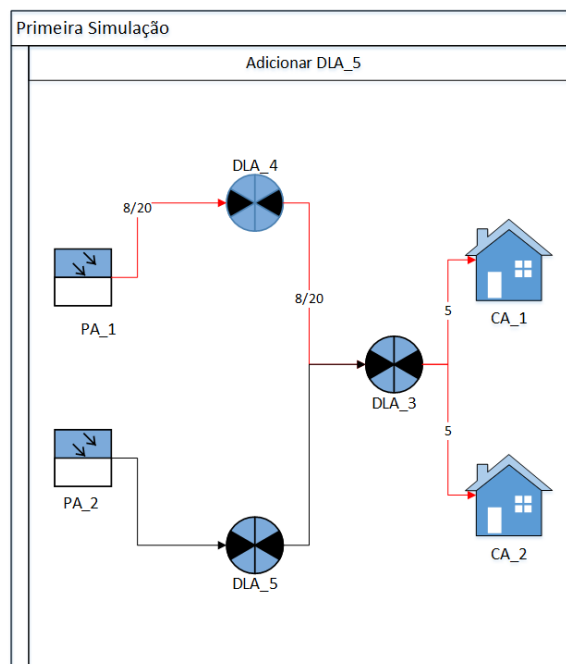


Figura 30 - Primeira Simulação - Adição do Nó DLA_5

O nó DLA_5 tem as seguintes ligações:

- PA_2 para DLA_5;
- DLA_5 para DLA_3.

Mesmo adicionando um novo nó o sistema não recorreu a divisão de energia.

5.1.1.2. Segunda Simulação

Na segunda simulação, o sistema é composto pelos seguintes componentes:

- 2 Produtores;
- 8 Postos de Distribuição;
- 10 Consumidores.

Na Tabela 6 pode-se ter conhecimento sobre os valores de energia de cada componente e em que situação se encontram relativamente ao estado inicial.

Tabela 6 - Informações sobre cada componente

Identificador	Tipo de Agente	Estado	Energia
PA_1 e PA_2	Producer Agent	Inicial	50
DLA_1, DLA_2, DLA_3, DLA_4, DLA_5, DLA_6, DLA_7 e DLA_8	DistributorLine Agent	Inicial	20
CA_1, CA_2, CA_3, CA_4, CA_5, CA_6, CA_7, CA_8, CA_9 e CA_10	Consumer Agent	Inicial	5
DLA_9 e DLA_10	DistributorLine Agent	Futuro	20

O exposto na Tabela 6 transmite o cenário inicial da segunda simulação. Esta sofrerá alterações ao longo do sistema, como indica o exposto na Figura 31.

A primeira alteração sofrida foi a remoção do posto de distribuição DLA_1. A segunda alteração sofrida foi a adição de um posto de distribuição DLA_9. Depois, repetiu-se o processo, removendo o posto DLA_7 e, mais tarde, adicionando o posto DLA_10. Todas estas alterações introduzidas no sistema permitiram visualizar as mudanças que o mesmo sofre. As mudanças podem ser observadas nas seguintes figuras:

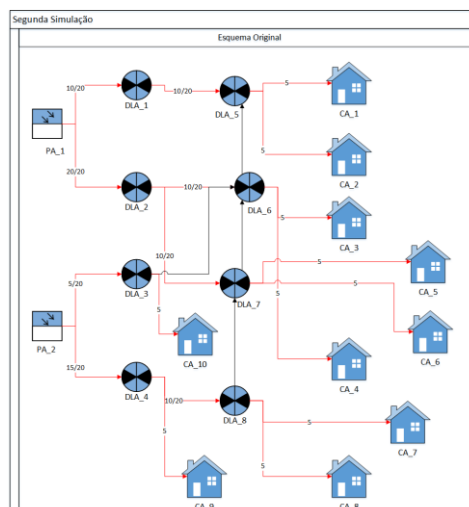


Figura 31 - Segunda Simulação - Esquema Original

Na Figura 31 representa o estado original na segunda simulação, e pode-se observar o fluxo de energia.

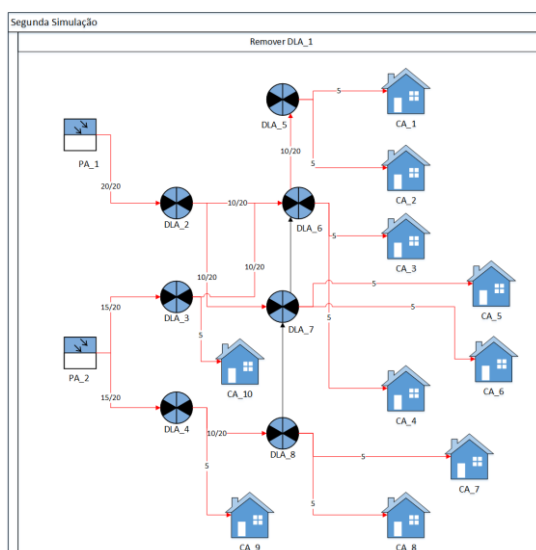


Figura 32 - Segunda Simulação - Remoção do Nó DLA_1

Com a remoção do nó DLA_1 o sistema optou por distribuir energia pelo nó DLA_3, na qual em vez de passar 5 de energia passou a distribuir 15, sendo que após isso enviou para o nó DLA_6, 10 de energia, que enviou o mesmo valor para o nó DLA_5 para distribuir para os consumidores CA_1 e CA_2.

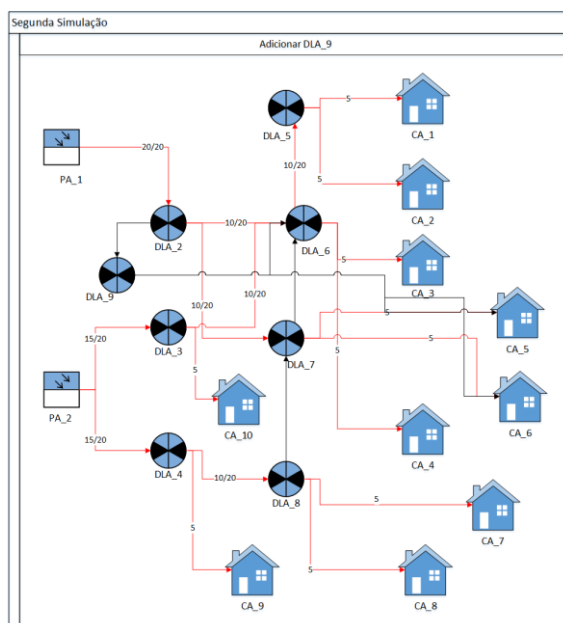


Figura 33 - Segunda Simulação - Adição do Nó DLA_9

O nó DLA_9 tem as seguintes ligações:

- DLA_2 para DLA_9;
- DLA_9 para DLA_6;

- DLA_9 para CA_5;
- DLA_9 para CA_6.

Ao termos adicionado este novo nó, verifica-se que não teve alteração nenhuma no fluxo de energia, sendo que não irá distribuir energia para nenhum outro nó.

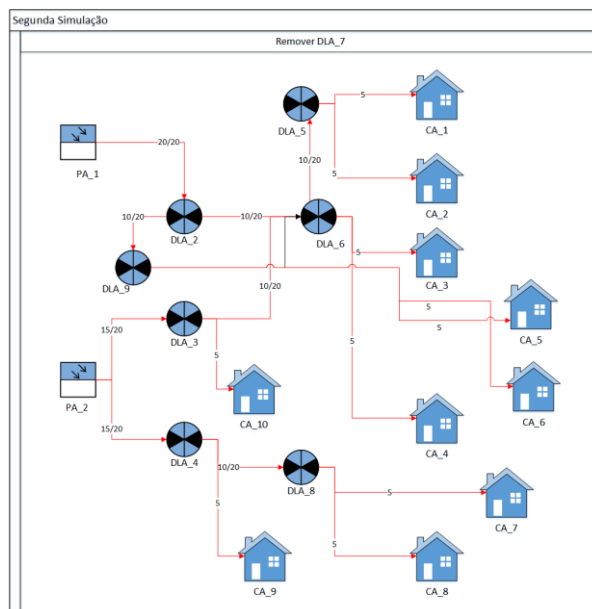


Figura 34 - Segunda Simulação - Remoção do Nó DLA_7

Neste caso a remoção do nó DLA_7 já teve impacto nomeadamente nos consumidores CA_5 e CA_6, logo o sistema optou por passar 10 de energia pelo nó DLA_9, essa mesma energia tinha como objetivo os consumidores anteriormente mencionados.

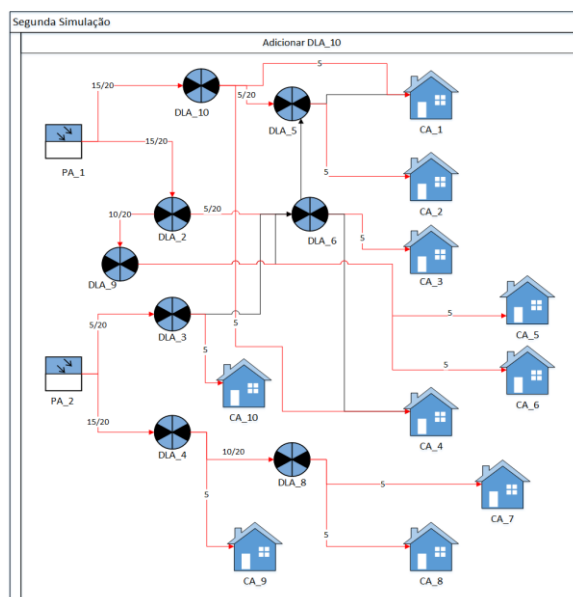


Figura 35 - Segunda Simulação - Adição do Nó DLA_10

O nó DLA_10 tem como ligações as seguintes:

- PA_1 para DLA_10;
- DLA_10 para DLA_5;
- DLA_9 para CA_1;
- DLA_9 para CA_4.

Com adição deste novo nó, o nó DLA_3 passou a receber do produtor PA_2, 5 de energia em vez dos 15 anteriormente, e o nó DLA_2 que recebia 20 do produtor PA_1, passou a distribuir 15. Sendo que o novo nó DLA_10 começou a distribuir 15, sendo 5 para o CA_1, 5 para o CA_4, e o restante para o DLA_5.

5.1.1.3. Terceira Simulação

Nesta terceira simulação, apresentamos um caso mais realista, um caso com múltiplos distribuidores e produtores e, obviamente, consumidores. Analisamos os tempos de atualização da rede e os locais por onde passará a energia tal como nos casos anteriores.

Para esta simulação teremos os seguintes componentes:

- 3 Produtores;
- 19 Postos de distribuição;
- 20 Consumidores.

Na Tabela 7 podemos tomar conhecimento sobre os valores de energia de cada componente e em que situação se encontram relativamente ao estado inicial.

Tabela 7 - Informações sobre cada componente

Identificador	Tipo de Agente	Estado	Energia
PA_1, PA_2 e PA_3	Producer Agent	Inicial	50
DLA_1, DLA_2, DLA_3, DLA_4, DLA_5, DLA_6, DLA_7, DLA_8, DLA_9, DLA_10, DLA_11, DLA_12, DLA_13, DLA_14, DLA_15, DLA_16, DLA_17, DLA_18 e DLA_19	DistributorLine Agent	Inicial	20
CA_1, CA_2, CA_3, CA_4, CA_5, CA_6, CA_7, CA_8, CA_9, CA_10, CA_11, CA_12, CA_13, CA_14, CA_15, CA_16, CA_17, CA_18, CA_19 e CA_20	Consumer Agent	Inicial	5
DLA_20 e DLA_21	DistributorLine Agent	Futuro	20

A primeira alteração sofrida foi a remoção do posto de distribuição DLA_1. A segunda alteração sofrida foi a adição de um posto de distribuição DLA_20. Depois, repetiu-se o processo, removendo o posto DLA_11 e, mais tarde, adicionando o posto DLA_21. Todas estas alterações introduzidas no sistema permitiram visualizar as mudanças que o mesmo sofre. As mudanças podem ser observadas nas seguintes figuras:

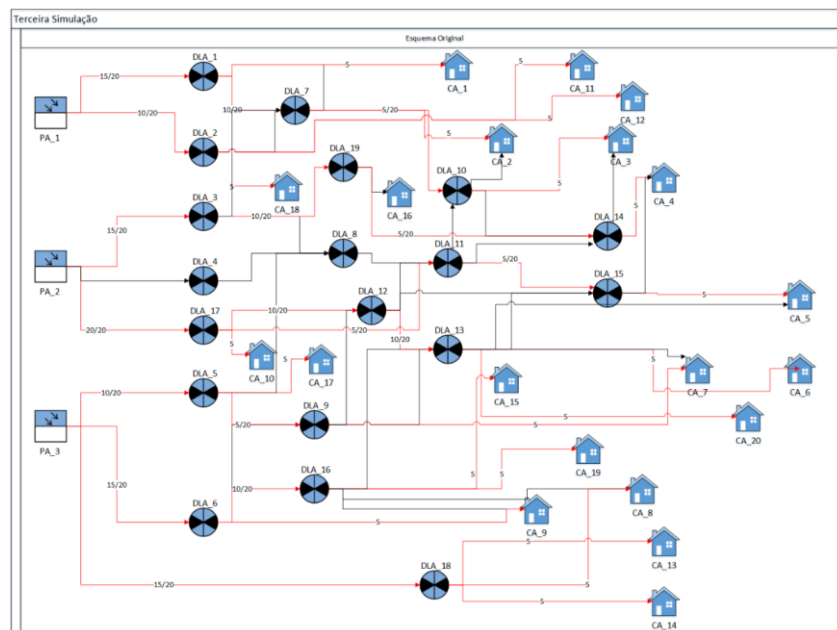


Figura 36 - Terceira Simulação - Esquema Original

Na Figura 36 representa o estado original na terceira simulação, e pode-se observar o fluxo de energia.

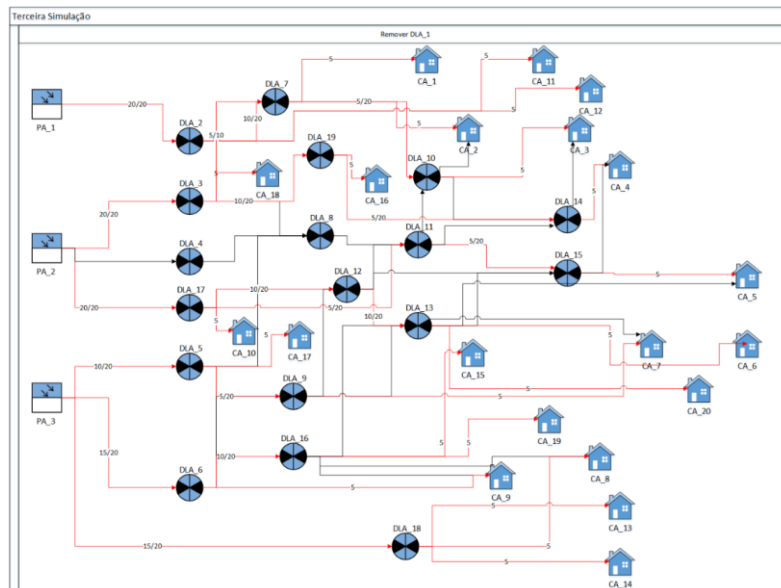


Figura 37 - Terceira Simulação - Remoção do Nó DLA_1

Com a remoção do nó DLA_1 o sistema teve que se adaptar e assumir novos caminhos para os nós em que passada a energia proveniente do DLA_1. O nó DLA_2 começou a receber 20 de energia do produtor PA_1, quando antes recebia 10, e o nó DLA_3 começou a receber do produtor PA_2, 20 ao contrário dos 15 de anteriormente.

Sendo que os 5 adicionais do DLA_3 vão para o nó DLA_7 tal como os 10 adicionais do DLA_2. A partir daí o nó DLA_7 irá distribuir 5 de energia para cada um dos consumidores CA_1 e CA_7 e o restante para o nó DLA_10.

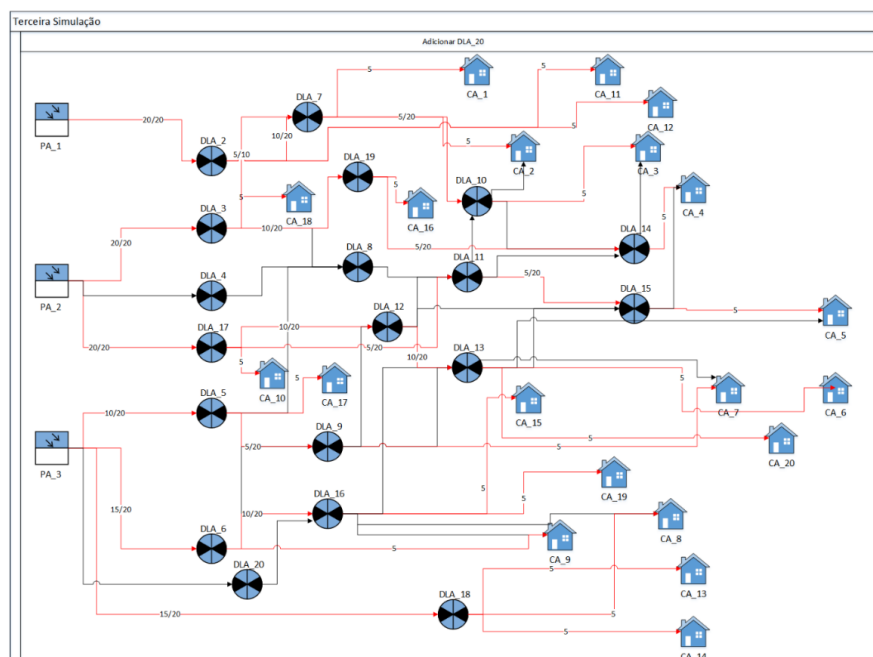
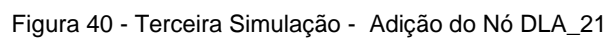
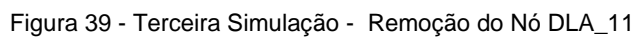


Figura 38 - Terceira Simulação - Adição do Nó DLA_20

- PA_3 para DLA_20;
- DLA_20 para DLA_16.



O nó DLA_21 tem como ligações as seguintes:

- PA_1 para DLA_21;
- DLA_21 para CA_1;
- DLA_21 para CA_2.

Ao termos adicionado este nó, ficou com um cenário parecido ao da Figura 36. Sendo que o nó DLA_2 começou a receber apenas 15 de energia do produtor PA_1, e o mesmo sucede com o DLA_3 pois começou a receber 15 em vez dos 20 do produtor PA_2.

O novo nó DLA_21 usa essa energia para fornecer ao consumidor CA_1 e CA_2.

5.2. Discussão de Resultados

Todas as simulações em que se adicionaram ou removeram nós foram testadas trinta vezes. As figuras seguintes apresentam as três simulações efetuadas, incluindo as alterações de nós e o devido tempo associado em milissegundos.

Como anteriormente explicado, as alterações foram realizadas durante a execução do sistema. Logo, é possível perceber os tempos de passagem de um sistema mais simples para um sistema mais complexo.

O tempo descrito refere-se ao tempo que é necessário para a transformação da arquitetura, desde a introdução da mudança até à sua atualização efetiva, contemplando o envio de energia para novos nós ou a remoção de nós.

Na Figura 41, podemos aferir os tempos dos trinta ensaios realizados, concluindo que os tempos são relativamente mais baixos numa simulação simples. A referência a 0 milissegundos é, na verdade, a referência à casa dos nanossegundos.



Figura 41 - Resultados Temporais da Primeira Simulação

Os valores de média e desvio padrão da primeira simulação referentes ao adicionar e remover nós encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Média e desvio padrão da primeira simulação

	ADICIONAR NÓS	REMOVER NÓS
MÉDIA (MS)	0,2667	0,55
DESVIO PADRÃO (MS)	0,4422	0,5299

No caso da Figura 42, como a simulação já é composta por mais nós, notamos algumas diferenças, nomeadamente, no momento da remoção de nós, onde contamos com um maior tempo quando comparando esta à primeira simulação, contudo sempre com tempos baixos à volta de milissegundos ou mesmo de nanosegundos.

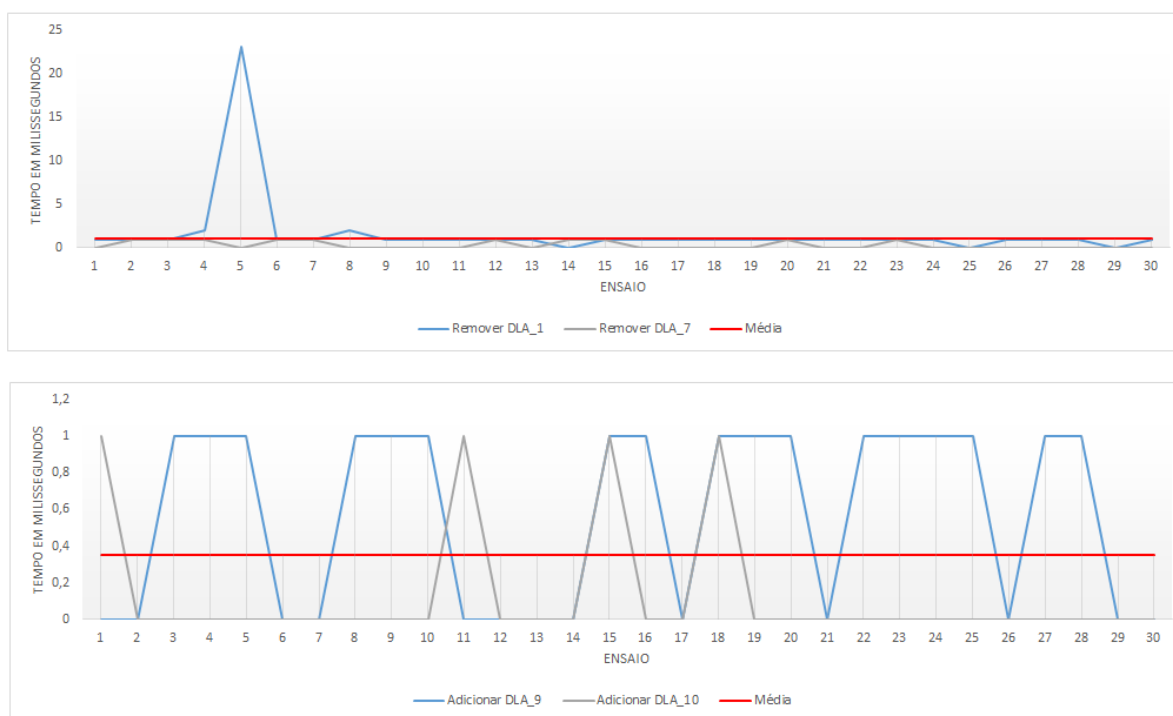


Figura 42 - Resultados Temporais da Segunda Simulação

Os valores de média e desvio padrão da segunda simulação referentes ao adicionar e remover nós encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Média e desvio padrão da segunda simulação

	ADICIONAR NÓS	REMOVER NÓS
MÉDIA (MS)	0,35	1,0167
DESVIO PADRÃO (MS)	0,4770	2,9126

A Figura 43 apresenta o esperado: a terceira simulação compreende o dobro dos nós da segunda simulação, logo, o tempo da atualização será maior. No entanto, as atualizações analisadas em todas as simulações nunca chegaram ao tempo avaliado em segundos.

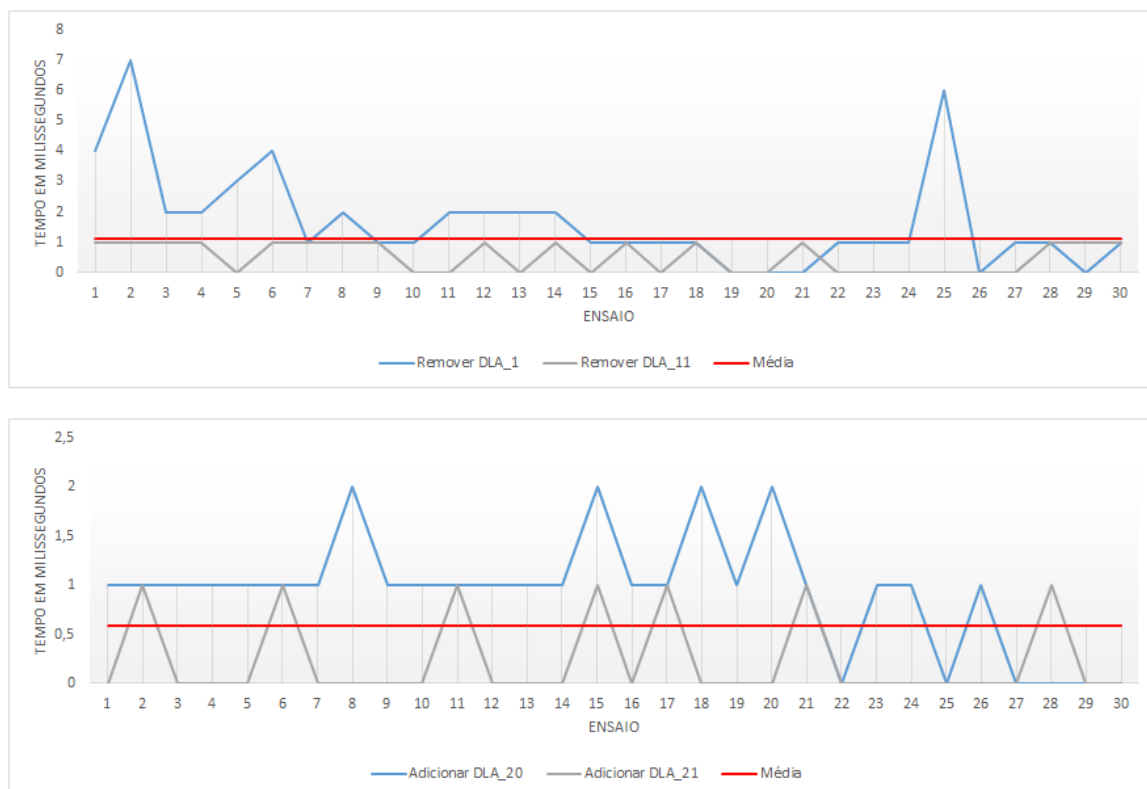


Figura 43 - Resultados Temporais da Terceira Simulação

Os valores de média e desvio padrão da terceira simulação referentes ao adicionar e remover nós encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Média e desvio padrão da terceira simulação

	ADICIONAR NÓS	REMOVER NÓS
MÉDIA (MS)	0,5833	1,1167
DESVIO PADRÃO (MS)	0,6135	1,3428

Poder-se-á verificar a conclusão na Figura 44, na qual mostra os tempos médios do remover e do adicionar de cada simulação, tempos em milissegundos.

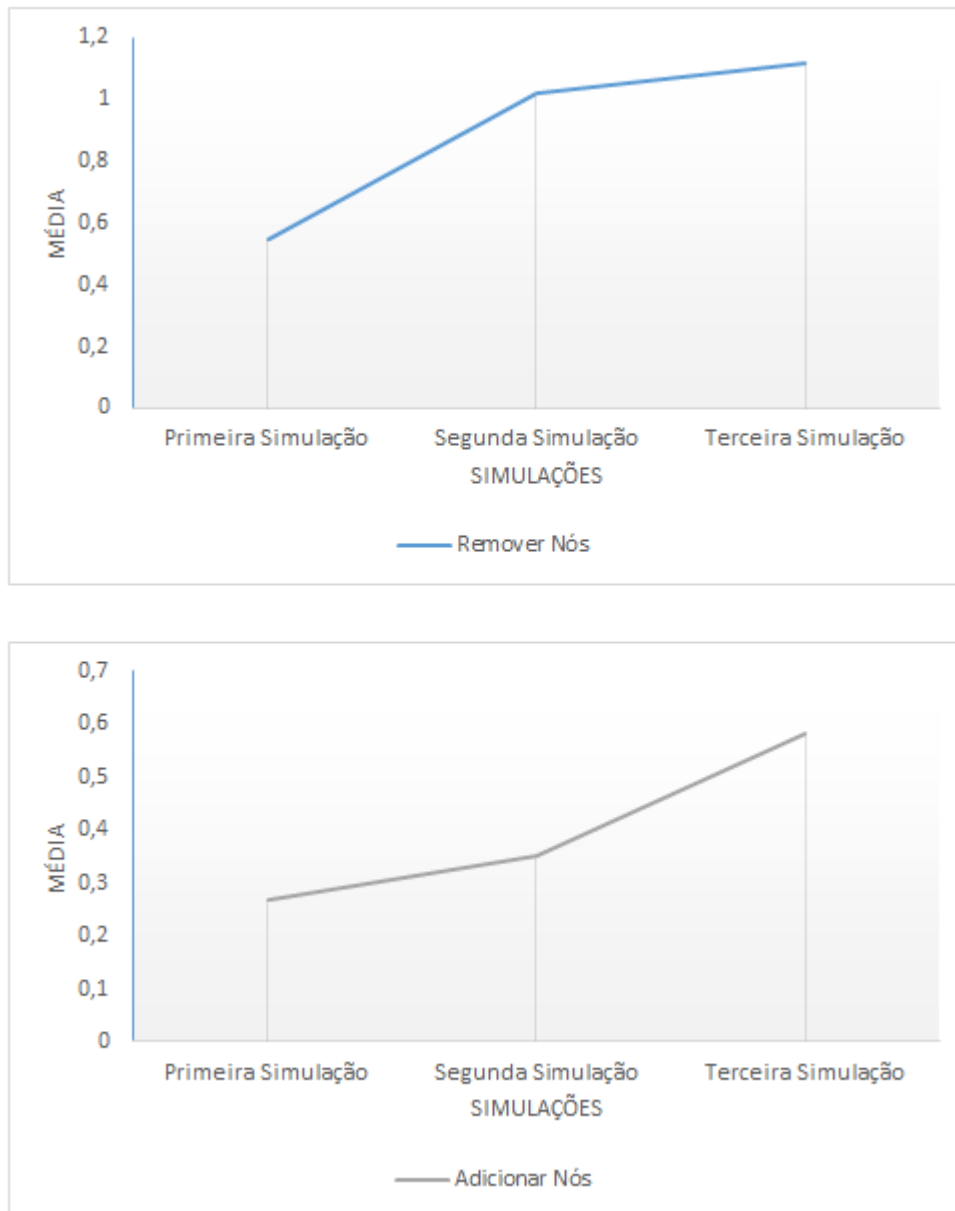


Figura 44 - Resultados das três simulações

Não obstante, a elevação do número de nós no sistema, o tempo de resposta foi na casa dos nanosegundos e/ou milissegundos.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

6.1. Conclusões

Com o trabalho desenvolvido ficou assim provado que uma arquitetura multiagente auto-organizada pode ser utilizada no contexto de distribuição de energia.

Os resultados obtidos são expectáveis e conclui-se que obtêm uma boa resposta aos problemas simulados, sendo bastante eficiente a fazer toda a gestão da rede elétrica. Esta solução desafia e torna o conceito de SmartGrid (SG) como importante, pois é bastante vantajoso e com um enorme potencial de gestão.

A abordagem para as questões colocadas em 1.2 e com a respetiva solução, torna-se claro que é um sistema relevante, resolvendo as questões de arquitetura que poderiam tornar as SG questionáveis. A solução não convencional, mas dinâmica e realista para o desenvolvimento de novas técnicas para a distribuição de energia e gestão da rede.

Apesar de todos os testes serem realizados em ambiente virtual, foram realizados em número suficiente, quer em termos de simulações quer em termos de ensaios, e conseguimos ver todo o sistema a reagir com as alterações com os respetivos tempos de atualização de toda a rede elétrica. Ao analisarmos os tempos deparamos que se apresentam na casa dos milissegundos, sendo uma boa resposta para as simulações.

6.2. Trabalho Futuro

Como trabalho futuro será necessário levar em conta dois aspetos, o primeiro uma interface mais user friendly, pois a interface que é apresentada neste momento dota de lacunas e de ser mais complexa o manuseamento da mesma, nomeadamente para pessoas que não têm conhecimento da área.

Outro aspeto importante será a incorporação de um algoritmo para o problema de fluxo multiproduto.

O problema de fluxo multiproduto consiste em haver um aumento de pedidos de fluxo entre os nós de origem e os nós de destino. Dentro deste campo, temos duas situações, uma poder haver valores fracionários de energia, pois no nosso caso aceita apenas valores inteiros e a outra baseia-se no problema de decisão.

Para o primeiro problema a solução será a utilização da programação linear (LP), para o segundo caso, o problema de decisão, poderá ser resolvido pelo NP-Complete.

O NP-Complete é aplicado para o problema de decisão, na qual após uma tomada de decisão poderá ser verificado em tempo polinomial. Problema de decisão tem uma resposta sim ou não, diferente, mas relacionada ao problema de otimização ao tentar maximizar/minimizar um valor (Sen, 2011).

Um problema de programação linear pode ser definida como o problema de maximizar ou minimizar uma função linear sujeito a restrições lineares. As restrições podem ser igualdades ou desigualdades (Ferguson, 2015).

Com estes dois aspetos realizados acrescentado uma interface mais amigável para o utilizador, tornar-se fulcral pois são melhorias relevantes para uma melhor gestão de energia e controlo da mesma. Resultando um sistema mais completo, mais dinâmico e mais inteligente.

Durante o trabalho realizado foi escrito um artigo, An Evolvable and Adaptable Agent Based Smart Grid Management – A Simulation Environment. Este irá ser apresentado na conferência SOHOMA'16 (<http://www.sohoma16.cimr.pub.ro/>).

7. Referências

- Ali, T., Faruk, M. O., & Gupata, S. D. (2012). Tidal Power: An Option for Alternative Sustainable Power Generation in Bangladesh. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2.
- Alrikabi, N. K. (2014). Renewable Energy Types. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2.
- Amorim, P. S. (2003). A Rede de Transporte e a sua História Evolutiva.
- Bagher, A. M. (2014). Biomass Energy. *International Journal of Environment and Bioenergy*, 171-195.
- Bagher, A. M., Vahid, M., Mohsen, M., & Parvin, D. (2015). Hydroelectric Energy Advantages and Disadvantages. *American Journal of Energy Science*, 2, 17-20.
- Bellifemine, F., Caire, G., & Greenwood, D. (2004). *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. Wiley.
- Chamorro, J. M., & Montes, R. d. (2013). An Agent-Based Approach for Data Fusion in Homeland Security. *International Journal of Artificial Intelligence and Interactive Multimedia*.
- Dongale, T. D. (2013). Smart Grid: Nurture New Dimensions to Conventional Grid.
- Dooren, P. V. (2009). Graph Theory and Applications.
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey. *Colorado School of Mines*.
- Ferguson, T. S. (2015). University of California - Department of Mathematics. *Linear Programming*.
- GeeksforGeeks. (2015). *GeeksforGeeks*. Obtido de <http://www.geeksforgeeks.org/bipartite-graph/>
- Gharehchopogh, F. S., Seyy, B., & Feyzipour, G. (2012). A New Solution for N-Queens Problem using Blind Approaches: DFS and BFS Algorithms. *International Journal of Computer Applications*.
- Joy, J., Jasmin, D. E., & John, V. R. (2013). Challenges of Smart Grid. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2, 976-981.
- Kappagant, R., Senn, S., Mahesh, M., & Daniel, S. A. (2015). Smart grid implementation in India – A case study of Puducherry pilot. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 7, 94-101.
- Kempe, D. (24 de Novembro de 2004). Lecture Notes on the Edmonds/Karp algorithm. Obtido de <http://www-bcf.usc.edu/~dkempe/teaching/>
- Keyhani, A., & Marwali, M. (2011). *Smart Power Grids*. EUA: Springer.
- Khan, M. A.-A., Rashid, A., Khan, A. R., & Uddin, M. S. (2013). An Innovative Approach for Solving Maximal-Flow Problems. *Journal of Physical Sciences*, 17, 143-154.
- Low, S. (2014). Distributed Optimal Power Flow Algorithm. *California Institute of Technology*.
- Patel, V., & ChitraBaggar, P. (2014). A Survey Paper of Bellman-Ford Algorithm and Dijkstra Algorithm for Finding Shortest Path in GIS Application. *International Journal of P2P Network Trends and Technology (IJPTT)*, 5.
- PORDATA. (2016). *Base de Dados Portugal Contemporâneo*. Obtido de <http://www.pordata.pt/Portugal/Produção+de+energia+elétrica+total+e+a+partir+de+fontes+renováveis-1127/>
- Prasad, M. I. (2014). Smart Grid Technology: Application and Control. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*.
- Project, N. E. (2016). History of Electricity.
- Ribeiro, P. (2015). Fluxo Máximo. *Faculdade de Ciências da Universidade do Porto*. Obtido de http://www.dcc.fc.up.pt/~pribeiro/aulas/daa1415/slides/9_fluxo_14122014.pdf
- Rocha, A. D. (2013). An Agent Based Architecture for Material.
- S.N.Singh. (2008). *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution*.
- Sanan, S., Jain, L., & Kappor, B. (2013). Shortest Path Algorithm. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 2.
- Sen, S. (2011). Princeton University - Department of Computer Science. *P, NP, and NP-Completeness*.
- Tarau, P. (2013). Edmonds-Karp Algorithm. *Department of Computer Science and Engineering at the University of North Texas*.
- Wooldridge, M. (2002). *An Introduction to MultiAgent Systems*. Inglaterra: John Wiley & Sons, LTD.